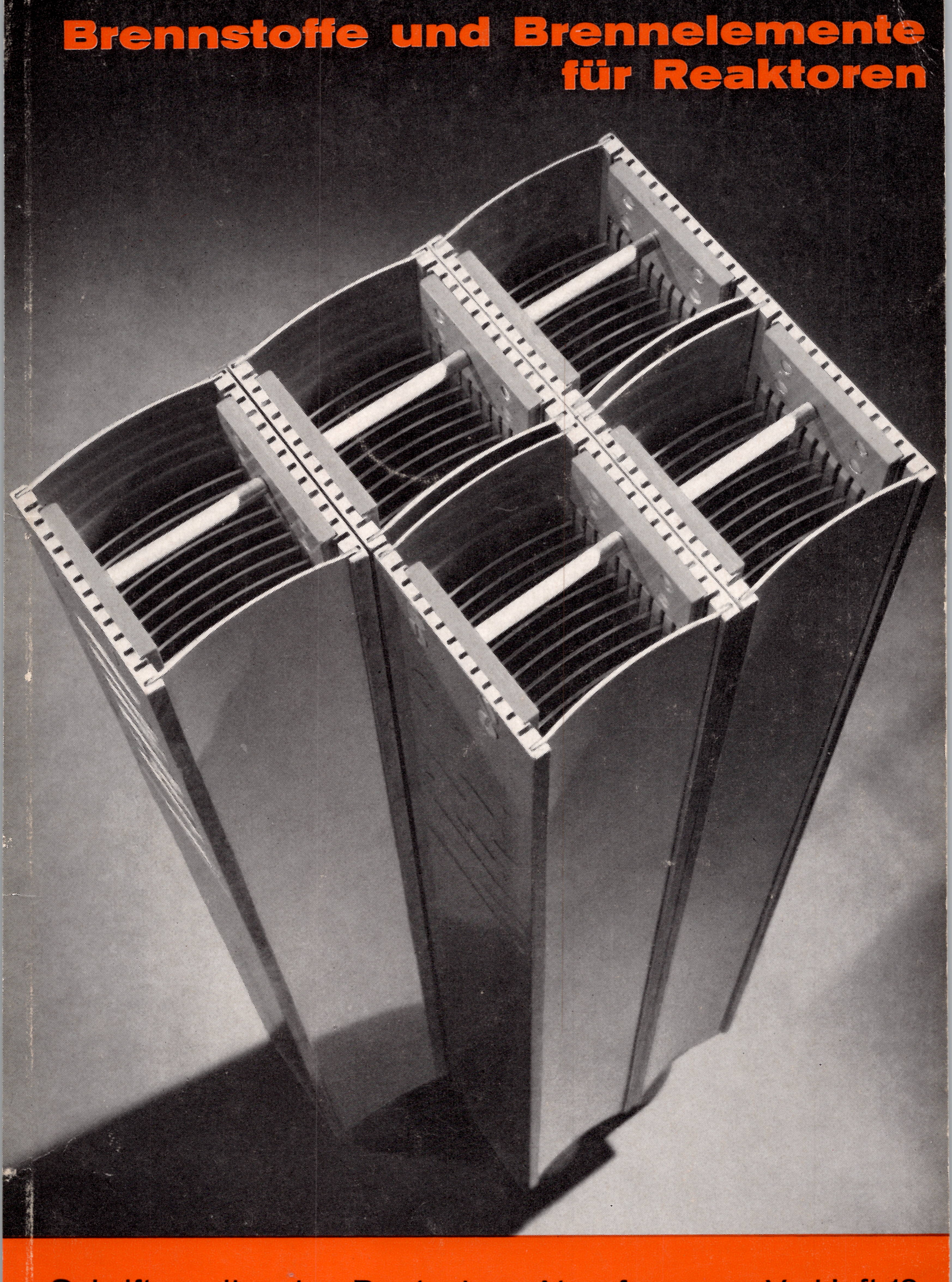
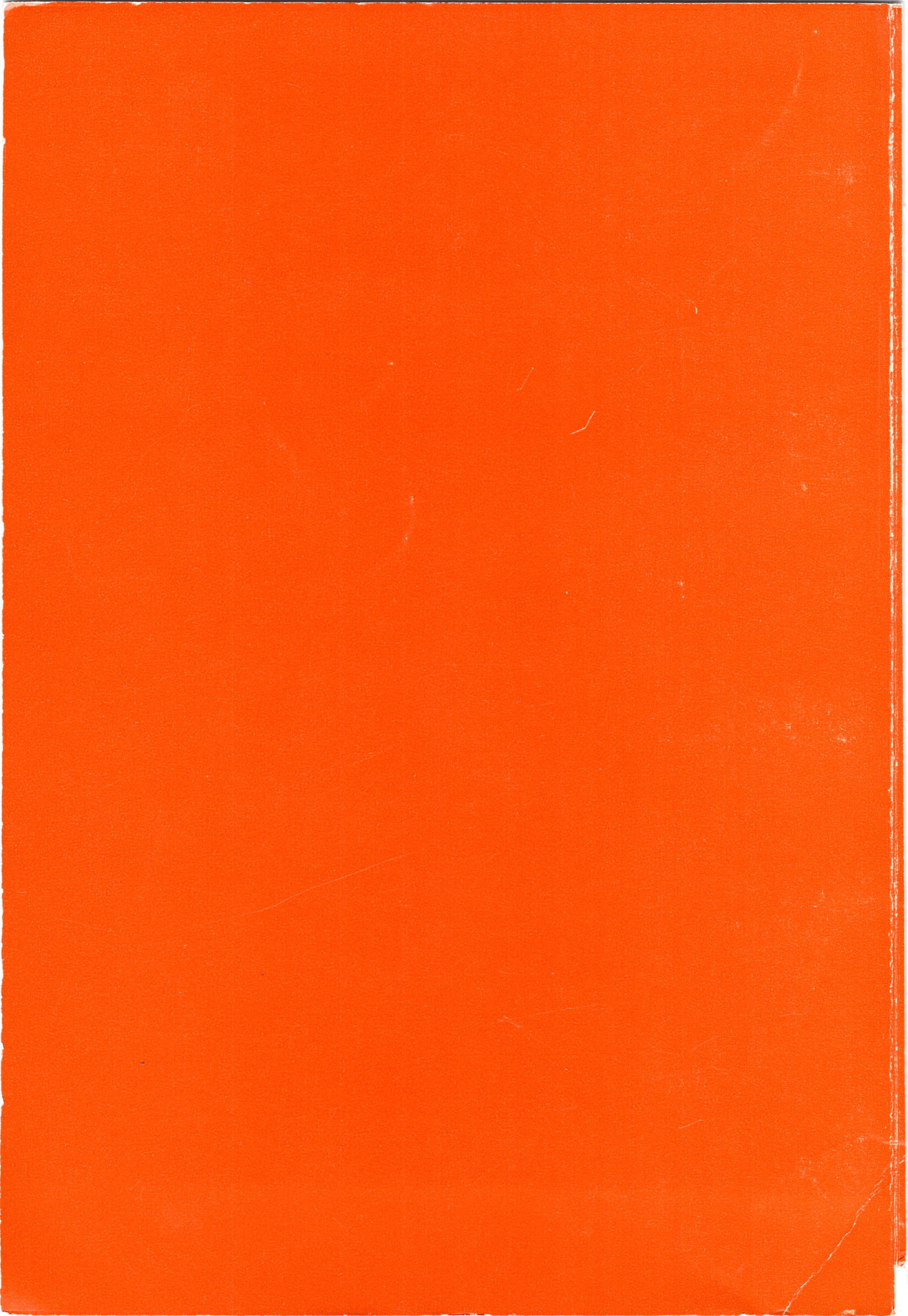
Brennstoffe und Brennelemente für Reaktoren



Schriftenreihe des Deutschen Atomforums e.V., Heft 12



Schriftenreihe des Deutschen Atomforums e.V.

Heft 12

Brennstoffe und Brennelemente für Reaktoren

Materialien und Herstellungsverfahren einer neuen Technik

Herausgeber: Deutsches Atomforum e.V. · Bonn, Koblenzer Straße 240

1963

Inhalt

Bilder:

Archiv Dr. Steinert
Deutsche Babcock und Wilcox-Dampfkessel-Werke A. G.
Gewerkschaft Brunhilde
Maltner
NUKEM

Druck: Gebr. Hermes KG · Bonn

Das Uran und seine Geschichte

Diplom-Geologe Dr. Harald Steinert, Kiel

Im Jahre 1789 isolierte der Berliner Chemiker Klaproth aus böhmischer Pechblende eine Substanz, die er als neues Metall bezeichnete. Er gab diesem Metall dem Zeitgeschmack entsprechend den Namen „Uran" – nach dem römischen Gott „Uranus". Ein französischer Chemiker wies jedoch 1842 nach, daß dieses Uran nur das Oxyd des reinen Metalls gewesen war, und präparierte als erster metallisch reines Uran. Die Klaprothsche Benennung allerdings wurde beibehalten.

Die technische Anwendung des Urans blieb vorerst im wesentlichen auf den Bereich der Keramik- und Glasfarben beschränkt. Uran ergibt nämlich beispielsweise sehr gute rotgelbe „Scharffeuerfarben" für die Porzellanindustrie. Das sind Farben, die mit dem Porzellanscherben im „Garbrand" erhitzt werden können, unter der Glasur liegen und daher sehr haltbar sind (Unterglasurfarben). Größere Bedeutung gewann das Uran, als sich 1898 bei der Entdeckung des Radiums durch Madame Curie herausstellte, daß Uranerze normalerweise sehr kleine Mengen Radium enthalten. Die sich rasch ausbreitende Anwendung des Radiums in der Medizin und der ungewöhnliche Preisanstieg im Jahre 1906 (für 1 g Radiumbromid rund 600 000 Goldmark) führten zu einem Boom des Uranbergbaus – zunächst für die ältestbekannte Lagerstätte St. Joachimsthal im damaligen Böhmen, dann für die nordamerikanischen Lagerstätten des Colorado-Plateaus. Diesen folgte 1923 die Ausbeutung der Vorkommen in Belgisch-Kongo, die weitere zehn Jahre lang praktisch ein Weltmonopol für Uran-Radium-Produktion innehatten. 1933 wurden sie von den neuentdeckten kanadischen Lagerstätten am Großen Bärensee überrundet. Die Uranproduktion war inzwischen soweit gestiegen, daß das aus den Uranerzen gewonnene Radium trotz zunehmendem Preisverfall nicht mehr vom Markt aufgenommen werden konnte. So schlief 1939 der Uranbergbau in Shinkolobwe in Belgisch-Kongo ein; 1942 wurde auch der Abbau in Kanada eingestellt.

Zu diesem Zeitpunkt hatte sich allerdings die Lage auf dem Uranmarkt schon entscheidend durch die Entdeckung der praktischen Anwendungsmöglichkeiten der Kernspaltung gewandelt. Uran erwies sich als einziger, in der Natur vorhandener „Kernbrennstoff" für Atomkraftwerke und für militärische Zwecke. 1943 wurden deshalb der Uranbergbau in Kanada wieder aufgenommen und die Suche nach neuen Lagerstätten fortgeführt. Vor allem mit radiologischen Prospektionsmethoden (das im Gestein vorhandene Uran zerfällt unter Aussendung radioaktiver Strahlen, die mit dem Geiger-Müller-Zählrohr und dem weit empfindlicheren Szintillometer gemessen werden) konnte innerhalb weniger Jahre eine Fülle neuer und teilweise sehr großer Lagerstätten entdeckt werden. Die Produktion stieg erneut beträchtlich an.

1959 erreichte die Uranproduktion in der Welt ihren vorläufigen Höhepunkt. Die Erzeugung dieses Jahres kann in einer Größenordnung von 50 000 t Uranoxyd angesetzt werden. Die Angabe von Größenordnungen erfolgt, weil viele kleinere und mittlere Produktionsländer keine Statistiken geben und aus dem Ostblock praktisch keine Angaben über die Höhe der Erzeugung vorliegen. Zu jenem Zeitpunkt zeigte sich bereits, daß die laufende Erzeugung den Bedarf, der damals überwiegend durch die militärische Anwendung des Urans entstand, weit überstieg. Daraufhin wurde die Weltproduktion zunehmend gedrosselt. Wie lange die 1960 einsetzende Schrumpfung in der Uranwirtschaft andauern wird, bleibt abzuwarten. Allerdings darf damit gerechnet werden, daß der Uranbedarf der Energiewirtschaft verhältnismäßig schnell anwachsen wird. Die Euratom-Versorgungsagentur rechnet für 1970 mit einem Bedarf, der zu einer kräftigen Ausweitung der bis dahin voraussichtlich weiter rückläufigen Erzeugung führen könnte. Zu ähnlichen Feststellungen gelangten auch die Amerikaner.

Das Metall Uran und seine Minerale

Uran ist ein stahlgraues Metall, dessen Farbe sich an der Luft sehr schnell durch Oberflächen-Oxydation in ein stumpfes Schwarz verwandelt. Die wichtigsten physikalischen Daten des Urans sind:

Dichte (hochreines Uran)	19,05 kg/cm^3
Schmelzpunkt	1 132 °C
Siedepunkt	3 818 °C

Mit seinem hohen spezifischen Gewicht ist Uran eines der schwersten Metalle. Seine physikalischen Eigenschaften wie Dichte, elektrische Leitfähigkeit und Wärmeausdehnung sind bei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich. Bei Überschreitung bestimmter Temperaturgrenzen nach unten oder oben wechselt im Uran die Anordnung der einzelnen Atome sprungartig, d. h., es ändert sich der Aufbau der Kristalle, aus denen Uran – wie jedes andere Metall – besteht. Durch diese sogenannten „Phasenwechsel" ändern sich auch die physikalischen Eigenschaften. Das erschwert die Verwendung des Urans in der Reaktorpraxis außerordentlich, weil in modernen Reaktoren zeitweilig mit sehr hohen Temperaturen gearbeitet wird. In diesen Anlagen werden die Uran-Brennelemente immer wieder über die Umwandlungstemperaturgrenzen des Metalls erhitzt und abgekühlt, was zu technisch stark komplizierenden Veränderungen der Brennelemente führen kann.

In der Natur kommt Uran stets als Gemisch verschiedener Isotope vor, d. h. als Gemisch von chemisch identischen, im Aufbau des Atomkerns und damit in den kernphysikalischen Eigenschaften voneinander oft sehr abweichenden Formen. Vor allem ist die „Halbwertszeit" (die Zeit, in der die Hälfte eines

radioaktiven Stoffes durch Abgabe von Strahlung zerfällt) für die drei in der Natur vorkommenden Uran-Isotope völlig unterschiedlich. Natur-Uran besteht aus:

99,28 % des Isotops U 238, Halbwertszeit 4,5 Milliarden Jahre,
0,71 % des Isotops U 235, Halbwertszeit 800 Millionen Jahre,
0,005 % des Isotops U 234, Halbwertszeit 200 000 Jahre.

Von diesen Isotopen kommt U 234 wegen seiner Seltenheit praktisch keine Bedeutung zu. U 235 dagegen ist das einzige in der Natur vorkommende Isotop (aller chemischen Elemente), bei dessen Kernspaltung gewisse Spaltprodukte (Neutronen) in ausreichender Zahl entstehen. Sie induzieren ihrerseits die Spaltung anderer Atomkerne und leiten so eine technisch verwendbare und Energie liefernde Kern-Kettenreaktion ein. U 238 vermag zwar keine Kern-Kettenreaktion zu erzeugen, kann jedoch (wie das ebenfalls schwere Element Thorium) durch Aufnahme von Neutronen aus einer Spaltung von U 235 in Elemente umgewandelt werden, die ihrerseits unter Einleitung einer Kern-Kettenreaktion und Energieabgabe spaltbar sind. Bei diesem Prozeß bildet U 238 das (in der Natur – jedenfalls auf der Erde – unbekannte) Element Plutonium; Thorium liefert das Uran-Isotop 233. Plutonium und Uran 233 sind künstliche Kernbrennstoffe, während U 235 ein natürlicher Kernbrennstoff ist.

In der Kerntechnik wird vorerst fast ausschließlich Uran angewendet: entweder natürliches Uran, in dem der Kernzerfall des darin vorhandenen U 235 abläuft und Wärmenergie liefert, oder Uran mit verschiedener Anreicherung des U 235.

In den Gesteinen der Erdkruste tritt Uran entweder als eigenes Mineral auf (als Mineral, in dem Uran ein typischer Bestandteil des Kristallgitters ist) oder im Gestein verteilt als zufälliger Neben-Gemengeteil anderer Minerale. In beiden Formen kann das Uran in einer Gesteinspartie derart angereichert vorkommen, daß seine Extraktion wirtschaftlich rentabel wird. Ein solches Gestein ist dann eine „Lagerstätte". Man kennt weit über hundert verschiedene Uranminerale; die wichtigsten enthält die Tabelle auf Seite 18.

Bildung von Lagerstätten

Die oberen 20 bis 30 Kilometer der Erdkruste enthalten durchschnittlich 0,0003 % Uran. Durch chemische und physikalische Prozesse wird das Uran – wie andere Metalle – in den Gesteinen zu höheren Konzentrationen bis zur nutzbaren Lagerstätte angereichert.

„Endogene" (innerirdische) Lagerstätten bilden sich durch Schmelzfluß-Prozesse innerhalb der Erdkruste. Dabei werden, vor allem in Zonen der Gebirgsbildung, durch hohe Temperaturen und unter hohem Druck Gesteine

zunächst verflüssigt. Diese kristallisieren dann langsam wieder aus, wobei sich Uran mit anderen Schwermetallen in Restlösungen konzentriert. Die Restlösungen bleiben verhältnismäßig lange flüssig und entfernen sich oft von dem Magmenherd, bis sie schließlich in Spalten und Gängen des Erdinneren erkaltend ebenfalls auskristallisieren. Dabei entstehen die typischen, metallreichen Erzgänge mit oft sehr großen und schönen Kristallbildungen. In diesen Lagerstättentypen tritt Uran meistens in den Mineralen Pechblende oder Uranitit auf. Die wichtigsten Typen dieser endogenen Lagerstätten werden im allgemeinen nach den das Uran begleitenden Metallen und Mineralen unterschieden:

1. Uranführende Flußspatgänge, in denen das „Fluor-Erz" Flußspat wichtigster Bestandteil ist. Dieser Flußspat ist durchwachsen von Uranmineralen, wie Uraninit oder Pechblende.
2. Uranführende Erzgänge mit Eisen- und Titanoxyden; Uran tritt dabei vielfach als (sonst sehr seltenes) Mineral Davidit auf.
3. Uran-Kobalt-Nickel-Wismut-Silber-Erzgänge; Uran als Uraninit oder Pechblende zwischen wechselnden Erzmineralen der oben genannten Metalle.

„Exogene" (oberirdische) Lagerstätten entstehen durch die Zerstörung der „primären", im Erdinneren „endogen" gebildeten Lagerstätten durch Verwitterung (oder auch durch Zerstörung von uranführenden Gesteinen, die nicht direkten Lagerstättencharakter hatten) und durch die Wiederanreicherung des Metallgehalts dieser verwitterten Gesteine in neugebildeten Gesteinen der Erdoberfläche („Sedimenten"). Je nach den Vorgängen bei dieser Wiederanreicherung werden die verschiedenen „exogenen" oder „sedimentären" Lagerstättentypen eingeordnet.

Die Vorgänge bei dieser Lagerstättenbildung sind außerordentlich vielgestaltig. Wird das Ursprungsgestein nur mechanisch zerstört und bleiben seine Mineralkörner erhalten, so werden diese durch Rinnsale und Flüsse als Sand bis ins Meer fortgeschwemmt. Dieser Sand enthält sowohl leichte wertlose Quarzkörner als auch schwere Erzkörner. Im fließenden Wasser wird dann oft unter bestimmten Strömungsverhältnissen der leichte Quarzsand fortgeschwemmt, so daß sich der schwere Erzsand stark anreichert. Diese Sand-Erzkonzentrationen sind die sogenannten „Erzseifen" des Bergmanns. Vollzieht sich vorwiegend ein chemischer Verwitterungsprozeß ohne durchgreifende Zerstörung des Gesteinskörpers, z. B. durch niedersickerndes Oberflächenwasser, so werden die Uranerz-Bestandteile (die chemisch sehr instabil sind) oft aufgelöst und in unmittelbarer Nähe des Ursprunggesteinskörpers in Spalten und Klüften zu Mineralneubildungen ausgefällt (mit typischen „Uranglimmer-Mineralen" wie Autunit, Torbernit usw.). Im Regelfall werden die verwitternden Gesteine ganz abgetragen, ihr Urangehalt gelangt als Lösung in das Grundwasser oder in abfließendes Oberflächenwasser.

Aus diesen stark verdünnten Uranlösungen können sich durch physikalisch-chemische Fällung des Urans wieder neue Lagerstätten bilden. Kohlen- und Asphaltgesteine vermögen durch chemische Fällung oder physikalische Absorption Uran an sich zu binden. Das Uran kann auch aus dem zirkulierenden Grundwasser durch chemische Reduktion ausgefällt werden (die reduzierte, chemisch niederwertige Uranverbindung ist schwer löslich; die hochwertige, oxydierte Verbindung dagegen in Wasser leicht löslich). Dieser chemische Prozeß der Reduktion wird durch organische Materie in den Gesteinen oder auch durch Bakterientätigkeit ausgelöst. Gewisse, im Gestein lebende Bakterien bilden Schwefelwasserstoffgas, das reduzierend wirkt. Selbst das Uran, das mit dem abfließenden Wasser in das Meer gelangt und dort in äußerster Verdünnung zwischen den anderen „Metallen des Meeres" vorhanden ist, wird durch natürliche Vorgänge (chemische oder physikalische Bindung) aus dem Meerwasser unter bestimmten Bedingungen wieder extrahiert und in Faulschlämmen oder Phosphatgesteinen auf dem Meeresgrund zu wirtschaftlich nutzbaren Lagerstätten angereichert. So ergeben sich mehrere Arten „exogener" Lagerstätten:

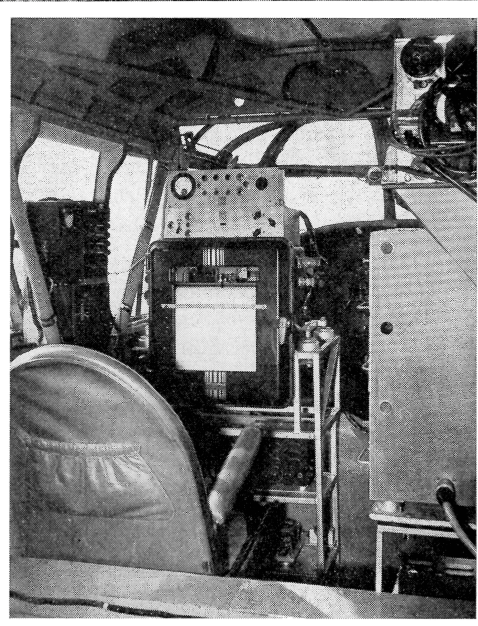
1. Seifen- oder Konglomerat-Lagerstätten (aus mechanisch verwitterten Erzkörnern angereichert);
2. Verwitterungslagerstätten;
3. Kohlen-Lagerstätten und Asphalt-Lagerstätten;
4. Sandstein-Lagerstätten;
5. Faulschlamm-Lagerstätten;
6. Phosphat-Gestein-Lagerstätten.

Die Konglomerat- und Sandsteinlagerstätten sind wirtschaftlich weitaus am wichtigsten; zu diesem Typ gehören nahezu neun Zehntel aller Uranvorräte der Welt.

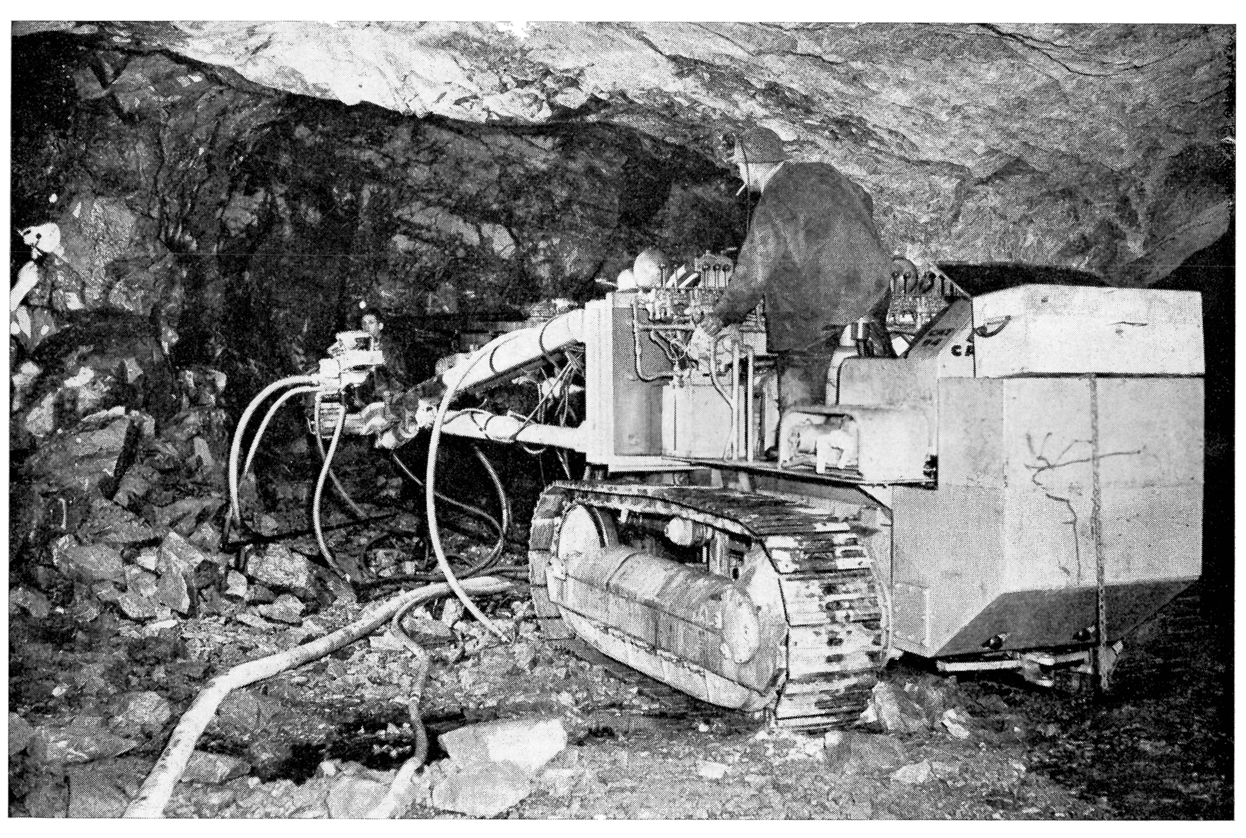
Uransuche, Uranbergbau und Verhüttung

Die Uranprospektion bedient sich teilweise der normalen geologischen und mineralogischen Methoden. Die radioaktive Strahlung des Urans hilft bei der Erzsuche insofern, als sie andere Minerale charakteristisch verfärbt und verändert und so zusätzliche Leitminerale für Uranvorkommen liefert: So wird Flußspat in violetten, beim Hammeranschlag stark riechenden „Stinkspat" und weißer Dolomit in rötlichen Dolomit verwandelt. Die Prospektion wird jedoch vorwiegend radiologisch mit Geiger-Müller-Zählrohr und Szintillometer durchgeführt. Der Einsatz von Flugzeugen (Airborne) und Kraftwagen (Carborne) zur Abtastung größerer Räume auf anomal hohe Strahlungsintensitäten läßt eine Übersicht des Geländes gewinnen. Stärkere Anomalien werden noch bis zu 500 m über dem Erdboden geortet. Kombinierte geologische, radiologische und bergmännische Methoden überprüfen dann, ob es sich um abbauwürdige Lagerstätten handelt.





Uranprospektion
vom Kraftwagen
(Bild oben)
und vom Flugzeug aus
(Bild unten)



Untertage-Erzabbau in einer Grube im Blind-River-Revier. Die Abb. zeigt die beträchtlichen Größenordnungen dieser Erzlagerstätte.

Der Uranbergbau wird mit den sonst im Metallerzbergbau üblichen Methoden betrieben. In Ausnahmefällen sind beim Untertagebau zusätzliche Belüftungsanlagen für die Abführung der gefährlichen gasförmigen Spaltprodukte des Uranzerfalls notwendig.

Ungewöhnlich sind dagegen die Verhüttungsverfahren. Fast das gesamte Uranerz der Welt wird „hydrometallurgisch" extrahiert, d. h. durch Auslaugen der Erze mit Säuren oder Laugen. (Im Gegensatz dazu werden die meisten anderen Metallerze durch Ausschmelzen des Metalls verhüttet.) Die Schwierigkeit ist dabei die Gewinnung des Urans aus der Extraktionslösung, in der neben Uran fast stets große Mengen von Eisen und oft zahlreiche andere Schwermetalle vorhanden sind. Für die reicheren, bis zum Zweiten Weltkrieg abgebauten Erze konnte man chemische Ausfällungsverfahren benutzen. Als sich in der Nachkriegszeit im „Uranboom" die Notwendigkeit ergab, extrem arme Erze zu verwenden – vor allem die südafrikanischen Erze des Witwatersrand mit etwa 0,03 % Urangehalt – wurde in den USA das sehr elegante Verfahren des „Ionenaustauschs" entwickelt. Dabei werden die in der Lösung schwebenden Uran-Ionen * an feste Kunstharze gebunden, die „ionenaustauschende" Eigenschaften haben, d. h. andere, an ihrer Oberfläche gebundene Ionen freizugeben, wenn sie mit spezifischen Ionen (wie den Uran-Ionen) in Berührung kommen. Die mit Uran beladenen Kunstharze werden dann von der uranverarmten Lösung getrennt; durch andere Ionenaustauschvorgänge wird das jetzt von den meisten Fremdmetallen befreite Uran wieder in Lösung gebracht und aus dieser – jetzt relativ uranreichen – Lösung dann (meist mit den üblichen chemischen Methoden) als Uransalz ausgefällt. Dieses gelbe bis rote Fällungsprodukt ist das „Konzentrat" der Uranstatistiken und Ausgangsprodukt für die nachfolgende Weiterverarbeitung zu Uranmetall, nuklearreinem Uranoxyd oder sonstigen Uranverbindungen.

Die Urangewinnung aus den Extrakten durch Ionenaustausch war ein sehr großer Erfolg der Nachkriegs-Technologie. Die Anreicherung des Urans aus seinen Extrakten durch Ionenaustauscher wird heute für den weitaus größten Teil der Produktion verwendet. Man kann heute Lagerstätten, selbst wenn sie im Untertagebau abgebaut werden müssen, bis hinab zu Uranoxydgehalten von 0,1 % rationell ausbeuten, falls die Vorräte ausreichend groß sind (bei einem bis vor kurzem durch die USA-Käufe gesetzten Preis von ca. 8 Dollar pro engl. Pfund ** aus dem Erz gewinnbaren Uranoxyds). In Süd-

* Viele chemische Verbindungen, vor allem Metallsalze, zerteilen sich in elektrisch geladene, negative und positive „Ionen", wenn man sie in Wasser oder anderen Flüssigkeiten auflöst. Dabei vollziehen sich dann in Lösungen chemische oder physikalische Prozesse zwischen den „Ionen".

** engl. Pfund = 453 g.

afrika können noch weit ärmere Erze verwendet werden, weil diese „Erze" aus den Abraumhalden der südafrikanischen Goldbergwerke bestehen. Erst 1946 wurde entdeckt, daß diese Golderze auch Uran enthalten. Da die Goldgewinnung bereits die Kosten für den Abbau und die Zerkleinerung des Roherzes aufbringt, sind diese Abfallprodukte der riesigen Goldminen für die Uranextraktion ein sehr preiswertes Erz.

Die Uranproduktion der Welt

(in short t zu 907 kg U_3O_8)

	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962
USA	4 200	7 650	12 560	16 197	17 330	17 399	16 900
Kanada	2 279	6 400	13 537	15 909	12 571	9 557	8 399
Südafrika	4 200	5 700	6 000	6 200	6 200	5 002	
Australien	..	..	1 000	..	1 100	1 100	
Frankreich	..	550	720	1 000	1 060	1 259	1 550
Belgisch Kongo			850	2 903	1 500	..	–
UdSSR *			7 000	..	..	..	..

Einen Begriff von den Größenordnungen der U_3O_8-Erzeugung der westlichen Welt mögen die Produktionsziffern der drei jüngsten Jahre vermitteln, die zugleich den Rückgang der Uranerzeugung erkennen lassen (die Fehlertoleranz beträgt ca. 250 t):

1960: 40 461 1961 34 617 1962: 32 700 (vorgeschätzt) short t

Die Uranbergbaureviere der Welt

Uran galt lange Zeit als ein ausgesprochen seltenes Metall. Bis zur Entdeckung seiner nuklearen Verwendung kannte man nur ganz vereinzelte Lagerstätten von Bedeutung (neben zahlreichen vorwiegend mineralogisch-petrologisch interessanten Kleinvorkommen). Erst der gesteigerte Uranbedarf der Nachkriegszeit und nicht zuletzt die sehr spezifische und bequeme Methode der radiologischen Uran-Prospektion ließen auf allen Kontinenten und in fast allen Ländern Uranvorkommen erschließen. Die Zahl der wirklich bedeutenden Uranbergbauländer blieb allerdings sehr beschränkt.

Die *USA* waren in der Periode der Urangewinnung für Radiumherstellung von 1913 bis 1923 der wichtigste Uranproduzent der Welt. Sie sind es in den letzten Jahren wieder geworden. Ihre Bedeutung beruht zum Teil auf besonderem Reichtum der Uranvorkommen, zum Teil aber auch darauf, daß die

* Viele kleinere und alle Produzenten des Ostblocks geben keine genauen Zahlen; von den genannten Zahlen beruhen nicht alle auf amtlichen Unterlagen.

Vereinigten Staaten als weitaus größter Uranverbraucher der Welt die inländische Erzeugung ohne Rücksicht auf Wirtschaftlichkeit stark forcieren. Die intensive Prospektion in der Nachkriegszeit – großenteils durch „Wochenend-Prospektoren", die Freizeit und Urlaub der Uransuche widmeten – führte zu der Entdeckung einer Unzahl kleinerer und kleinster Lagerstätten, so daß die Produktion in der zweiten Hälfte der fünfziger Jahre aus etwa 500 einzelnen Bergwerken kam. Heute hat sich die Erzeugung stark auf die mittleren und größeren Lagerstätten konzentriert. Sie ist jedoch völlig ausgerichtet auf die Belieferung der USA-Atomenergiekommission auf der Grundlage langjähriger Verträge.

Das Gros der Uranreserven in den USA (etwa 220 000 t U_3O_8) gehört zum Lagerstättentyp der „Sandsteinerze" – unregelmäßige Vorkommen in Sandsteinen mit erheblichen Einlagerungen fossilen Pflanzenmaterials. Diese Sandsteine entstanden als festländische Bildungen; zirkulierende uranführende Grundwässer lagerten darin die Uranerze ab. Das Colorado-Plateau ist das wesentliche Erzrevier; die dort oft zu Tage tretenden Lagerstätten werden vielfach durch leuchtend bunte Erzminerale in grünen, roten und gelben Farben angezeigt.

Kanadas Uranerzbergbau basiert auf größeren Reserven (etwa 400 000 t U_3O_8) und einer auf wenige Reviere und weitaus größere Betriebe konzentrierten und dadurch leistungsfähigeren Uranindustrie. Sie ist jedoch fast ausschließlich auf den Export, vor allem nach den USA, angewiesen. Der nachlassende Einkauf durch die USA und deren Förderung der Inlandindustrie in den letzten Jahren ist deshalb besonders spürbar.

Das älteste Bergbaurevier des Landes am Großen Bärensee – in der Radium-Periode von 1933 bis 1942 beherrschte es den Weltmarkt – mußte 1960 nach Erschöpfung der Erzreserven den Betrieb einstellen. Damit endete eine Epoche des Uranbergbaus, der noch in eine Pionierzeit der kanadischen Bergbauwirtschaft zurückreicht. Von den drei anderen Revieren ist das Revier von Bancroft von geringer und das Revier am Athabaska-See höchstens noch von mäßiger Bedeutung (die Erzvorräte dort sind nur noch beschränkt). Die Förderung und nahezu sämtliche Reserven konzentrieren sich auf das Blind River-Revier (oder Elliot Lake-Revier) nördlich des Lake Huron im Staat Ontario.

Es handelt sich um eine sehr gleichmäßig gelagerte Schicht-Lagerstätte vom Typ des Konglomerat-Erzes mit gleichmäßigem, jedoch geringem U_3O_8-Gehalt zwischen 0,8 % und 1,1 %, die sehr günstige bergtechnische Abbaubedingungen bietet. Dort entstand auch, begünstigt durch die kanadische Berggesetzgebung und die Struktur der Bergindustrie, eine Anzahl sehr großer Bergwerke; darunter das in seiner Kapazität für die Roherzverarbeitung weitaus größte Uranbergwerk der Erde: die Rio Algom Mines mit einem Tagesdurchsatz der Schacht- und Extraktionsanlage von 10 000 short t Roherz.

Hier im Blind-River-Revier wurden eine Uranstadt (Elliot Lake) und eine Industrie größten Ausmaßes mitten im kanadischen Urwald neu geschaffen.

Die Erzreserven im Blind-River-Revier dürften neben denen Südafrikas mit die größten der Erde sein. Gegenwärtig schrumpft zwar der kanadische Uranbergbau von Jahr zu Jahr als Folge der Absatzkrise der letzten Jahre. Doch dürften von den fast 20 zeitweise vorhandenen kanadischen Uranbergwerken die Anlagen im Blind-River-Revier die besten „Überlebenschancen" bis zur Wiederbelebung des internationalen Uranbergbaus im Lauf der siebziger Jahre haben.

Der Uranerzbergbau *Südafrikas* konzentriert sich völlig auf ein Revier, nämlich Witwatersrand, wo die größten Goldfelder der Welt liegen, deren Erz auch Uran enthält. Diese erst 1946 entdeckte Gemeinschaft des Urans mit dem Gold ist für die südafrikanische Uranwirtschaft von außerordentlicher Bedeutung. Sie ist die Voraussetzung für die Urangewinnung aus dem sehr armen (im Schnitt 0,03 %igen) Erz und macht die südafrikanischen Firmen auch bei sehr niedrigen Uranpreisen wettbewerbsfähig. Die Reserven dürften etwa 380 000 t U_3O_8 betragen.

Über zwanzig Goldbergwerke betreiben die Extraktion von Uran aus ihren Golderzen nach dem Ionenaustauschverfahren. Die Erze stammen aus einer geologisch einheitlichen Lagerstätte von Konglomerat-Erz, in weit ausgedehnten, gleichmäßigen und für einen Abbau gut geeigneten Schichten gelagert. Der Lagerstättentyp ist fast identisch mit dem Typ des Blind-River-Vorkommens (dem jedoch das Gold völlig fehlt). Auffälligerweise sind beide Vorkommen auch mit einem Alter von rund zwei Milliarden Jahren in der Alters-Größenordnung verwandt.

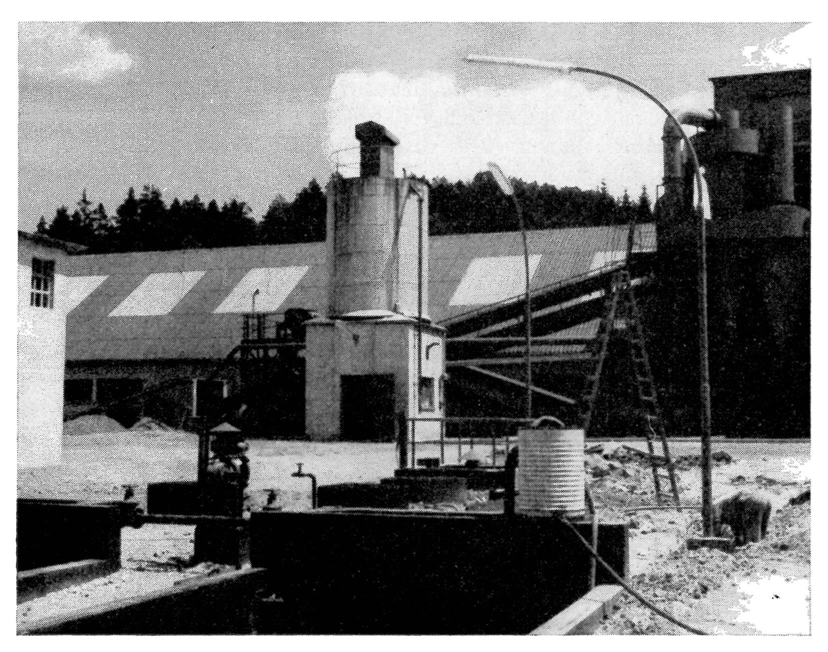
In *Frankreich* wurde in den Nachkriegsjahren eine große Anzahl von kleinen und mittleren Lagerstätten durch sehr intensive Prospektion mit staatlicher Förderung für Privatprospektoren völlig neu und fast wider Erwarten erschlossen. Es handelt sich zum weitaus größten Teil um Lagerstätten „endogener" Entstehung, um gangförmige Lagerstätten mit oft relativ hohem Gehalt von 0,3 % und mehr U_3O_8. Besonders verbreitet sind Flußspat-Uran-Gänge. Die französische Uranproduktion stammt aus einer großen Zahl von einzelnen Gruben verschiedenster Firmen und wird praktisch ausschließlich vom Inlandsbedarf absorbiert. Die Uranreserven Frankreichs werden mit 100 000 t U_3O_8 angegeben.

Auch der Uranbergbau *Australiens* wurde nach dem Krieg völlig neu entwickelt. Die Förderung erfolgt in vier Revieren, von denen nur das nordaustralische Revier von Rum Jungle und das Revier von Queensland größere Bedeutung besitzen. Die dortige Lagerstätte Mary Kathleen (so genannt nach der Ehefrau eines der Entdecker dieses Uranfeldes, eines Taxifahrers auf Wochenend-Prospektion) ist an der australischen Uranerzeugung mit etwa

75 % beteiligt. Darüber hinaus ist das Vorkommen vom Standpunkt der praktischen Geologie aus gesehen einmalig und hochinteressant. Es handelt sich um die einzige „Kontaktlagerstätte" der Erde, in der Uranerze an einer Zone des „Kontaktes" zwischen schmelzflüssigen Graniten und einem kalkigen Nebengestein angereichert wurden und wo diese Erze – vorwiegend Pechblende – von großen Anhäufungen der Erzminerale Seltener Erden (u. a. Cer-Mineralen) begleitet sind.

Der Uranbergbau im *Kongogebiet* verdient nur noch historische Aufmerksamkeit: Die einzige Lagerstätte des Kongos beherrschte von 1923 bis 1933 den Weltmarkt und bildete viele Jahre nach dem Krieg die wesentlichste Uranbasis der westlichen Welt. Schon 1960 wurde die Förderung aus diesem Vorkommen bei Shinkolobwe aufgegeben; nur noch Haldenerze wurden weiter aufbereitet. Die Vorräte an Uranerz sind erschöpft. Gewisse kleinere Vorkommen in der weiteren Umgebung wurden zwar bekannt, dürften jedoch bei den derzeitigen Uranpreisen kaum abbauwürdig sein.

In *Deutschland* wurden Uranlagerstätten von überregionaler Bedeutung bisher nur im sächsischen Erzgebirge um Schneeberg–Oberschlema aufgefunden.



Versuchsaufbereitungsanlage für Uranerze in Ellweiler

Diese Vorkommen sind typische „Erzgänge" endogener Entstehung, in denen Uran von Buntmetall- und Stahlveredler-Erzen (Kobalt-Nickel-Wismut-Silber) begleitet wird. Noch 1942 war der Uranreichtum der Schneeberger Erzgruben völlig unbekannt, obwohl dort lebhafter Bergbau auf kriegswichtige Metalle betrieben wurde. Die sowjetischen Besatzungsbehörden erschlossen nach dem Krieg unter der Firmierung der „Wismut AG" ein zweifellos bedeutendes Uranvorkommen, das heute nahezu erschöpft ist. Versuche zur Urangewinnung in Thüringen und am Harzrand scheinen wenig erfolgreich gewesen zu sein. Man baute dort uranführende Alaunschiefer ab.

In der Bundesrepublik wurde in der zweiten Hälfte der fünfziger Jahre durch eine größere Anzahl von Bergbaufirmen und einige staatliche Institutionen auf Uran prospektiert. Die Erfolge waren bescheiden, mit Ausnahme eines zur Zeit im Aufschluß befindlichen Vorkommens bei Menzenschwand im Schwarzwald. Dort hat man eine vorerst noch kleine Lagerstätte mit einem sehr hohen Urangehalt von über 1 % U_3O_8 im Roherz angetroffen; der Umfang der Reserven ist noch nicht genau errechnet. Eine andere, sehr kleine Lagerstätte mit möglicherweise 70 bis 80 t U_3O_8 und 0,15 % Uranoxydgehalt in Ellweiler in der Pfalz wird bereits seit einigen Jahren abgebaut. Verschiedene ebenso kleine oder noch kleinere Vorkommen sind bekannt; ihr Abbau lohnt sich jedoch bei der jetzigen Uranweltmarktlage nicht. Die deutschen Reserven dürften im Augenblick 400 bis 500 t U_3O_8 kaum übersteigen.

Die Kenntnisse über den Uranbergbau in den *UdSSR* sind gering. Lediglich die Tatsache, daß Uran in einer großen Anzahl von Bergwerken gewonnen wird, und nur spärliche rein mineralogisch-petrologische Daten über Lagerstätten sind bekannt. Es scheint, als ob in der Sowjetunion bis heute besonders große Vorkommen etwa von der Bedeutung der Konglomerat-Erzlagerstätten in Südafrika und Kanada nicht erschlossen worden sind.

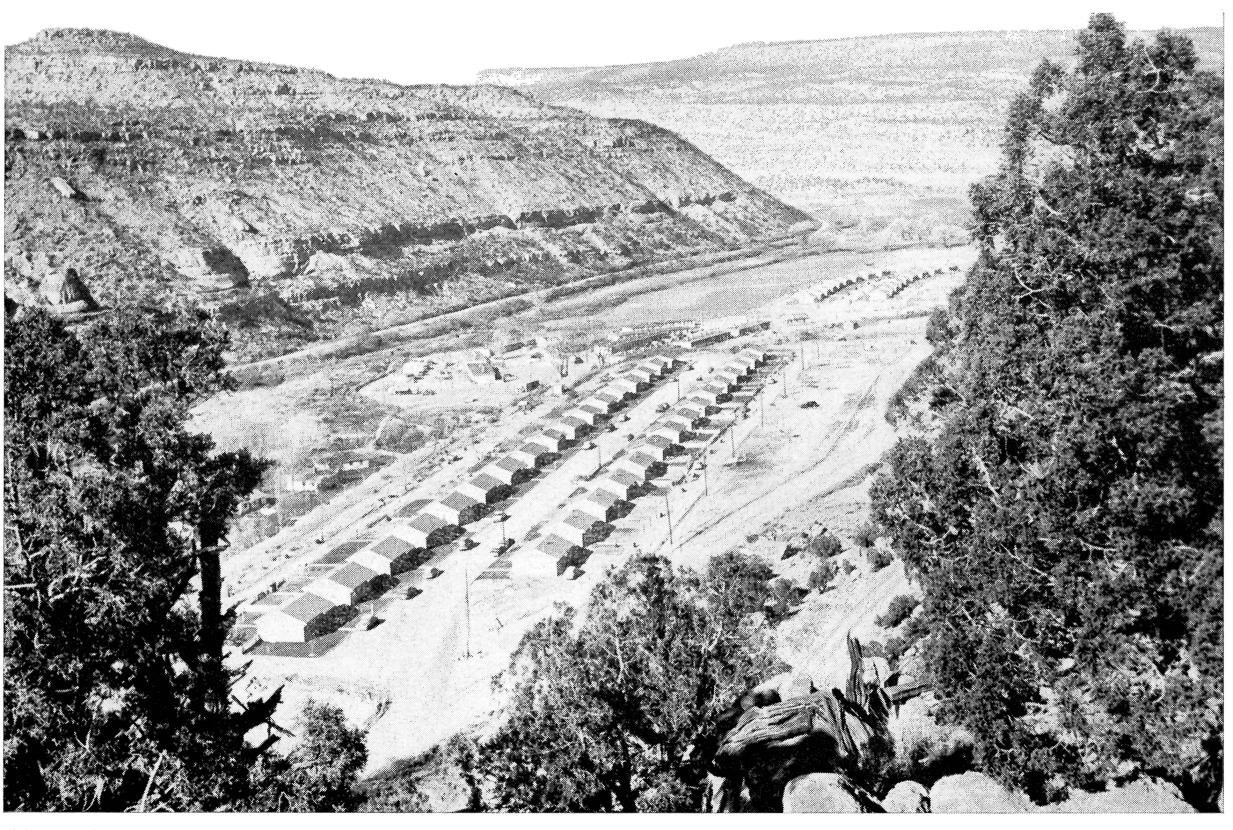
Der Uranbergbau in anderen Ländern spielt im Weltmaßstab keine wesentliche Rolle. Portugal hat eine Förderung, die möglicherweise mehrere hundert Tonnen im Jahr ausmacht; in Argentinien, Italien, Spanien, Japan, Indien und Schweden werden jährlich ein paar Dutzend Tonnen Uran gewonnen. Die Produktion der französischen Kolonien und assoziierten Gebiete, vor allem Madagaskars, sind in den Angaben über Frankreich enthalten. Über die zweifellos lebhaften Anstrengungen der Ostblockländer dringt so gut wie nichts nach außen.

Alphabetische Tabelle der wichtigsten und in der Bundesrepublik häufiger vorkommenden Uranminerale

Mineral	Chemische Konstitution	U_3O_8-* Gehalt in %	Aussehen typisch
Autunit	Wasserhaltiges Phosphat von Uran und Calcium	bis 62	Leuchtend gelbe oder gelbgrüne Täfelchen
Brannerit	Oxyd von Uran und Titan	bis 42	Schwarze Kriställchen mit braungelber Rinde
Carnotit	Wasserhaltiges Vanadat von Uran und Kalium	bis 63	Orangefarben, gelb oder gelbgrün, pulverig-erdig
Davidit	Oxyd von Uran, Eisen und Titan		Dunkelbraune bis schwarze Kristalle von glasigem Glanz
Monazit (zugleich wichtigstes Thoriumerz)	Phosphat von Thorium, Uran und Seltenen Erden	bis 0,5	Rote, braune und gelbe Kristalle
Pechblende **	Uranoxyd. Nicht-kristalline Form des Uraninit	bis 80	Schwarze, braunschwarze oder graue dichte „pechartige" derbe Masse, nierig-traubige Oberflächenstruktur
Thucholit	Feste Kohlenwasserstoffe mit Beimengung von Uran, Thorium, Seltenen Erden	bis 2	Pechschwarze dichte asphaltartige Masse
Torbernit	Wasserhaltiges Phosphat von Uran und Kupfer	bis 60	Leuchtend grüne glasglänzende Täfelchen
Tyuyamunit	Wasserhaltiges Vanadat von Uran und Calcium	bis 59	Gelbe bis grüne Täfelchen, oder erdig-dicht
Uraninit **	Uranoxyd. Kristalline Form der Pechblende	bis 80	Schwarze, schwarzbraune oder graue Kristalle mit starkem Glanz
Uranophan (auch Uranotil)	Wasserhaltiges Silikat von Uran und Calcium	bis 66	Zitronen- bis orangegelb
Zeunerit	Wasserhaltiges Arsenat von Uran und Kupfer	bis 55	Leuchtend grüne Täfelchen von hohem Glanz

* U_3O_8 = eine Form des Uranoxyds

** Die mineral-systematische Trennung von Pechblende und Uraninit (beides chemisch gesehen U_3O_8) ist umstritten. Vor allem westdeutsche Mineralogen erklären beide als identisch. Daher werden die beiden vielfach in der deutschen Literatur als „Uranpecherz" oder „Pecherz" zusammengefaßt. In der angelsächsischen Literatur allerdings werden sie scharf getrennt.



„Uranstadt" eines Bergbauunternehmens im Revier des Colorado-Plateaus



Uran-Schürfbohrung im Colorado-Revier

Uranversorgung und Uranreserven

(Nach einem Bericht des Beirates der Euratom-Versorgungsagentur vom 23. Oktober 1963)

Bis zum Jahre 1980 wird die gesamte freie Welt über ausreichende Mengen Uran verfügen, um den derzeitigen Rhythmus der Entwicklung auf dem Gebiete der industriellen Verwendung der Kernenergie aufrechtzuerhalten. Damit zu gegebener Zeit Uranreserven zum bestmöglichen Preis zur Verfügung stehen, müssen in Kürze geeignete Maßnahmen getroffen werden, besonders um die Prospektionsmethoden in den zahlreichen, noch nicht erforschten Gebieten der Erde mit abbauwürdigen Uranvorkommen zu verbessern. Die auf diese Weise eröffneten Versorgungsaussichten würden außerdem durch die Entwicklung der Brutreaktoren, die eine starke Erhöhung des Nutzeffektes der Uranreserven ermöglichen werden, noch beträchtlich vergrößert.

Bei den gegenwärtig bekannten Vorräten muß zwischen den Reserven, deren Abbau mit einem Verkaufspreis von höchstens 8–10 Dollar je lb * enthaltenes U_3O_8 – dem unter den derzeitigen Umständen allgemein angenommenen Referenzpreis – vereinbart ist, und den Reserven unterschieden werden, deren niedrigerer Urangehalt zu höheren Preisen führen würde. Man kennt allerdings eine Anzahl weiterer aussichtsreicher Vorkommen, deren Umfang und Abbaubedingungen angesichts der gegenwärtigen Marktlage noch nicht festgestellt worden sind.

Am 1. 1. 1962 bekannte Uranreserven

	Uranerze in Millionen Tonnen	Uranmetall in metrischen Tonnen
USA	64	130.000
Kanada	143	145.000
Südafrika	680	115.000
Übrige Länder		60.000
Freie Welt insgesamt		**450.000** **

Diese 450.000 t zu relativ niedrigem Preis sicher abbaubarer Uranvorräte bilden nur einen Bruchteil der vorhandenen Reserven. Der Bedarf bis 1970 ist bereits durch die Reaktorbauprogramme festgelegt. Danach zeichnet sich folgende Entwicklung ab:

* lb = engl. Pfund

** Mit welcher Vorsicht hier vorgegangen wurde, zeigt sich bei einem Vergleich dieser Zahl mit den im Seaborg-Bericht (Nov. 1962) geschätzten Reserven allein in den Vereinigten Staaten, der für Uranmetall, das zu Preisen von weniger als 50 $ abgebaut werden kann, die Zahl von 7 Millionen t nennt.

Entwicklung der Uranreserven 1962–1970
(in metrischen Tonnen)

	Reserven am 1. 1. 1962	Förderung 1962–1970	Reserven am 1. 1. 1971
USA	130.000	71.000	59.000
Kanada	145.000	25.000	120.000
Südafrika	115.000	18.000	97.000
Übrige Länder	60.000	16.000	44.000
Freie Welt insgesamt	**450.000**	**130.000**	**320.000**

In dem Bericht wird auch der Uranbedarf von 1970 bis 1980 untersucht. Dieser Zeitraum wurde vor allem wegen der Auswirkung der 1970 zu erwartenden Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie und der gegen 1980 vorgesehenen Inbetriebnahme der Brutreaktoren gewählt. Der Uranbedarf wird durch die zwischen 1970 und 1980 zu installierende Gesamtkernleistung bestimmt. Für die gesamte freie Welt erhält man bei vorsichtigen Schätzungen eine zwischen 1970 und 1980 zu installierende Gesamtkernleistung von etwa 100.000 MWe. Dieser Zahl entspricht ein Gesamtverbrauch an natürlichem Uran von 190.000 metrischen Tonnen, wenn man den Jahresverbrauch kumuliert, der von etwa 8.000 t im Jahre 1970 auf etwa 38.000 t im Jahre 1980 ansteigen wird.

Lage der Uranindustrie im Jahre 1970
(in metrischen Tonnen)

	Reserven am 1. 1. 1971	Jahreskapazität der in Betrieb befindlichen Anlagen
USA	59.000	6.000– 9.000
Kanada	120.000	1.000
Südafrika	97.000	2.000
Übrige Länder	44.000	1.500
Freie Welt insgesamt	**320.000**	**10.000–13.500**

Mit der im Jahre 1970 vorhandenen Produktionskapazität kann der für das gleiche Jahr errechnete Bedarf (8.000 t) ausreichend gedeckt werden.

Nach 1970 wird der bis zum Jahre 1980 auf 38.000 t ansteigende Bedarf die Inbetriebnahme neuer Förderanlagen auf bekannten Vorkommen erforderlich machen. Ab 1975 wird jedoch mit dem Abbau neuer Vorkommen begonnen werden müssen. Um ein Ansteigen der Preise zu verhindern, muß dieser Entwicklung durch ständige Prospektionsarbeiten vor allem in den zahlreichen noch unerforschten Gebieten Rechnung getragen werden.

Verteilung des Bedarfs und der Reserven nach Kontinenten
(in metrischen Tonnen)

	Kumulierter Bedarf 1970–1980	Mögliche Erzeugung aus bekannten Reserven
Europa	100.000	15.000
Nordamerika	70.000	154.000
Übrige Länder	20.000	
		Neue Vorkommen
		21.000
Insgesamt	**190.000**	**190.000**

Die Euratom-Kommission gelangt zu der Feststellung: Der Bedarf Europas, an dem die Gemeinschaft mit mehr als $^{3}/_{5}$ beteiligt ist, wäre zu einem guten Teil aus Einfuhren zu decken. Eine solche Lage wäre weder kommerziell noch politisch erstrebenswert. Europa muß also unverzüglich geeignete Maßnahmen ergreifen, um diesen Zustand zu ändern, indem es sich an der Erforschung und am Abbau neuer Vorkommen beteiligt, die Verbesserung der Prospektionsmethoden und der Abbau- und Erzaufbereitungsverfahren fördert sowie schließlich die beschleunigte Entwicklung der Brutreaktoren unterstützt. Eine solche Politik würde die Gefahr vermeiden, sich das erforderliche Uran zu unnötig hohen Preisen beschaffen zu müssen.

Kernbrennstoffe und Brennelemente für Reaktoren

Dr. rer. nat. Gerhard Matz, Wolfgang b. Hanau

Der Blick in einen Schwimmbadreaktor (Abb. 1) kann die Frage „Was sind Kernbrennstoffe und -brennelemente?" am eindrucksvollsten beantworten. Etwa sechs Meter unter der Oberfläche des Wassers, das die bei der Spaltung des Uranatomkerns und bei der Umwandlung der Kerntrümmer entstehende Strahlung abschirmt, befindet sich der Reaktorkern. Er ist ein Würfel von 60 cm Kantenlänge und aus beispielsweise 6×6 Brennelementen zusammengesetzt. Diese Brennelemente sind auswechselbare Einheiten, die den „Kernbrennstoff" enthalten. Der Kernbrennstoff „brennt" ab und muß in gewissen Abständen ersetzt werden.

Anstelle der Ausdrücke „Kernbrennstoff" und „Brennelemente" sollten besser die Begriffe „Spaltstoff" und „Spaltstoffelemente" verwendet werden, weil der Prozeß, der die Kernenergie freisetzt, keine Verbrennung, sondern eine Kernspaltung ist. Es hat sich aber eingebürgert, von „Kernbrennstoff" zu sprechen. Dadurch wird die Analogie zu einem konventionellen Kraftwerk deutlich, dessen fossiler Brennstoff (Kohle, Öl) dem Kernbrennstoff in einem Reaktor entspricht. Er ist ebenfalls Verbrauchsmaterial und muß laufend ersetzt werden.

Ein Schwimmbadreaktor ist allerdings noch kein Kernkraftwerk, sondern ein Forschungsinstrument des Wissenschaftlers. Während beim Kraftwerk die beim Kernspaltungsprozeß frei werdende Energie ausgenutzt wird, ist es beim Forschungsreaktor vorwiegend die Strahlung. Forschungsreaktoren sind wesentliche Voraussetzungen für den Entwurf und den Bau von Kraftreaktoren.

In den Tabellen II und III (S. 61/62) sind die in der Bundesrepublik in Betrieb oder Bau befindlichen Forschungs- und Kraftreaktoren zusammengestellt. Sie gewähren einen Überblick über die Vielfalt der Systeme. Die Zahl der Forschungsreaktoren überwiegt bei weitem, weil wir erst ein bescheidenes Stück auf dem Wege zum Kernkraftwerk zurückgelegt haben. Die verschiedenen Reaktortypen unterscheiden sich durch wichtige Merkmale, wie z. B. durch den Moderator, die Art des Kühlmittels und die Kühlmitteltemperatur. Im Zusammenhang damit sind auch bestimmte Arten von Kernbrennstoffen und Brennelementen charakteristisch für einen bestimmten Reaktortyp.

Einige Reaktoren, nämlich die Unterrichtsreaktoren vom Typ SUR (Siemens-Unterrichts-Reaktor) und die „homogenen" Reaktoren (Nr. 10–14 in Tabelle II), besitzen keine eigentlichen Brennelemente. Bei ihnen ist der Brennstoff entweder als Salz gelöst oder aber homogen in Kunststoff verteilt. Die anderen Reaktoren sind dagegen „heterogene" Reaktoren, die den Kernbrennstoff in auswechselbaren, charakteristischen Einheiten enthalten.

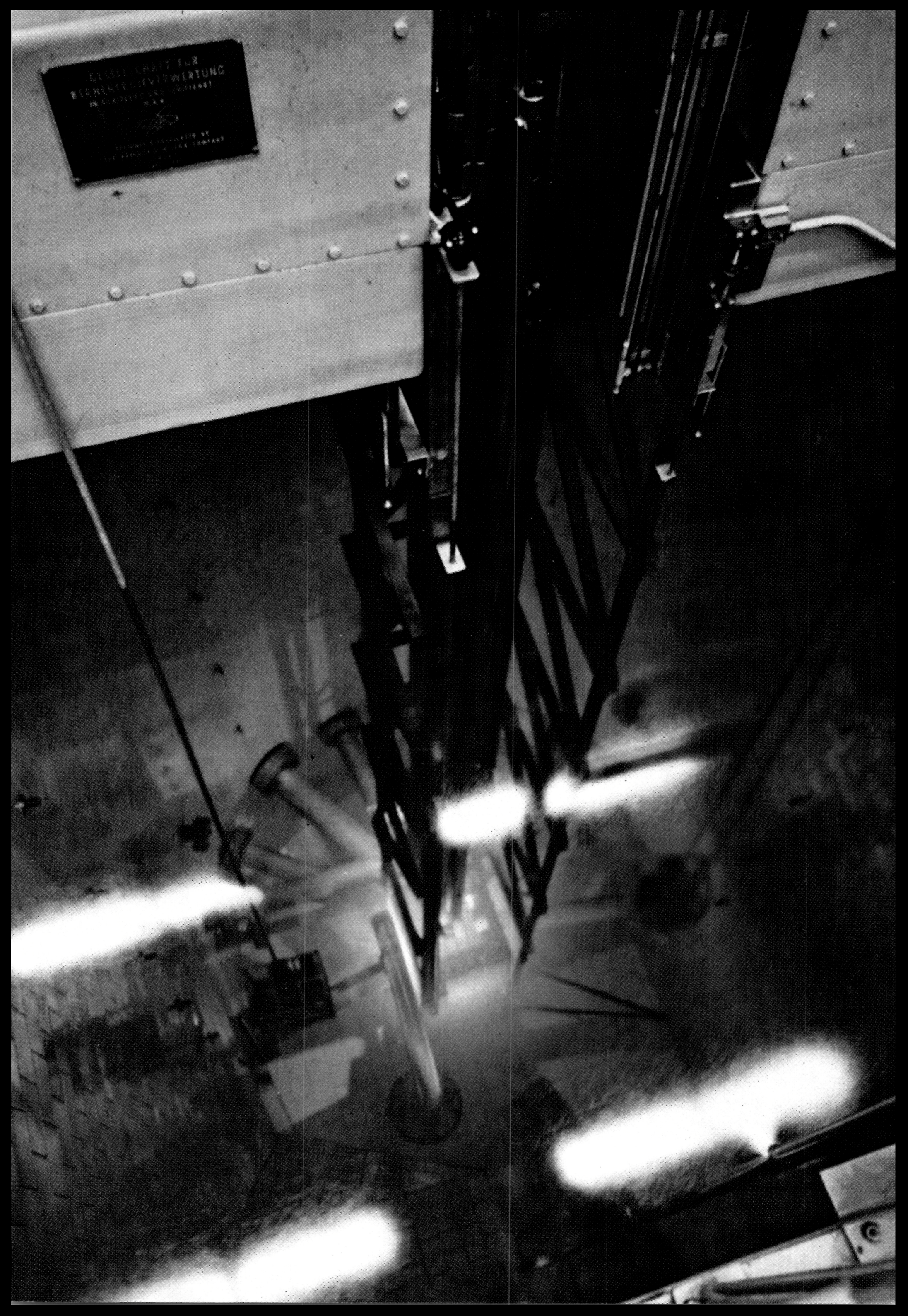


Abb. 1

Blick in den Schwimmbadreaktor Geesthacht während des Betriebs. Das Leuchten (Tscherenkow-Strahlung) am Boden des Reaktors geht von den Brennelementen im Reaktorkern aus, wo Kernspaltung und Kettenreaktion im Gang sind.

Der in den Elementen verwendete Brennstoff ist stets von einer Hülse umgeben, die meist aus Metall besteht. Diese Hülse soll sowohl den Brennstoff vor einem möglichen chemischen Angriff des Kühlmittels schützen als auch den Übertritt radioaktiver Spaltprodukte in das Kühlmittel verhindern.

Die Brennelemente eines Kernreaktors können sehr lange im Reaktor (einige Monate bis zu einigen Jahren) bleiben. Die Hülse muß deshalb sehr sorgfältig ausgewählt und behandelt werden. Dies gilt ebenso für den Vorgang des Umhüllens bei der Herstellung der Brennelemente.

Brennstoffart

Die in Spalte F der Tabellen II und III aufgeführten Brennstoffarten lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

Metallischer Brennstoff —	Dispersions-Brennstoff —	Keramischer Brennstoff —
Uranmetall, evtl. uranreiche Legierungen	uranarme Uran-Aluminium-Legierungen oder U_3O_8-Aluminium-Mischungen	Uranoxyd UO_2 Urancarbid

Die beiden Gruppen metallischer und keramischer Brennstoffe stellen in gewissem Sinne Gegensätze dar. Das zeigt sich besonders in der Art ihrer Verarbeitung. Uranmetall wird in der gleichen Art verformt und bearbeitet, wie es bei anderen Metallen, z. B. Eisen, üblich ist. Keramischer Brennstoff dagegen läßt sich auf diese Weise nicht verarbeiten. So ist z. B. Uranoxyd ein Pulver, das vorwiegend durch Sintern in kleine zylinderförmige Tabletten verwandelt wird.

Der Dispersionsbrennstoff stellt ein Bindeglied zwischen beiden Gruppen dar. Uranmetall oder U_3O_8 werden mit einem Überschuß von Aluminium verdünnt, so daß sie ähnlich wie Aluminium verarbeitet werden können, obwohl – wie im Falle einer Mischung aus U_3O_8 und Aluminium – der Brennstoff selbst nichtmetallisch ist.

Jede der drei Brennstoffgruppen hat Vor- und Nachteile. Die Wahl des Brennstoffes für einen bestimmten Reaktortyp hängt besonders vom Kühlmittel dieses Typs ab.

Kühlmittel

Die Tabellen II und III führen zwei verschiedene Kühlmittel auf, nämlich Wasser (leichtes Wasser oder schweres Wasser) und Helium. Darin kommt zwar bereits eine Alternative (Wasserkühlung oder Gaskühlung) zum Ausdruck. Die Liste der Kühlmittel muß jedoch ergänzt werden, besonders durch Kohlendioxyd (CO_2) sowie durch organische Flüssigkeiten und flüssige Metalle. Reaktoren, die diese Kühlmittel verwenden (etwa die zahlreichen

CO_2-gekühlten Kernkraftwerke in England und Frankreich), wurden in der Bundesrepublik bisher noch nicht errichtet.

Die zahlreichen Forschungsreaktoren in Tabelle II benutzen Wasser als Kühlmittel. Das Wasser erreicht eine Temperatur von maximal 60–70° C. Bei dieser Temperatur bleibt die Wahl des Brennstoffes frei. So kann Uranmetall wie beim FR-2 in Karlsruhe oder aluminiumreicher Dispersionsbrennstoff genommen werden, der für Forschungsreaktoren mit hochangereichertem Uran kennzeichnend ist. Kraftreaktoren dagegen arbeiten mit höheren Wassertemperaturen von mindestens etwa 250° C. Uranmetall, das z. B. bei einem Hülsenschaden mit Wasser dieser Temperatur in Berührung kommt, würde sehr rasch zu Uranoxyd und Wasserstoff reagieren. Der typische Brennstoff für solche Reaktoren ist deshalb UO_2, das sich gegenüber heißem Wasser völlig beständig verhält.

Gasgekühlte Reaktoren besitzen meistens einen Graphit-Moderator. Solange die Kühlgastemperatur bei 400° C, wie beim Calder-Hall-Reaktor, oder bei etwa 550° C, wie beim AGR (advanced gascooled reactor), liegt, läßt sich das billige Kohlendioxyd (CO_2) als Kühlmittel verwenden. Der Brennstoff ist in diesem Falle metallisches Uran oder UO_2. Wünscht man Kühlmitteltemperaturen von mehr als etwa 650° C, so kann CO_2 als Kühlmittel nicht mehr verwendet werden, weil es mit dem Kohlenstoff des Moderators zu CO reagiert (Boudouardsche Reaktion: $CO_2 + C \rightarrow 2\,CO$). Man ist dann gezwungen, ein Edelgas, nämlich Helium, zur Kühlung zu benutzen. Das Hüllmaterial der Brennelemente solcher „Hochtemperatur-Reaktoren" ist Graphit, weil nur er bei den angestrebten Temperaturen noch eine ausreichende Festigkeit aufweist. Die Graphithülse erfordert allerdings die Verwendung von Urancarbiden als Brennstoff, weil jeder andere Brennstoff, etwa Metall oder UO_2, früher oder später mit dem Graphit der Umgebung zu Carbiden reagieren würde.

Anreicherung

Die in Spalte H der Tabellen II und III verzeichneten Prozentzahlen nennen den Anteil des Isotops U-235 in dem verwendeten Uran. Natürliches Uran, gleichgültig wo es gefördert wird, setzt sich aus folgenden Isotopen zusammen:

U 238 etwa 99,3 % – nicht spaltbar
U 235 etwa 0,7 % – spaltbar.

Natürliches Uran enthält also das eigentliche spaltbare Isotop U 235 lediglich zu 0,7 %. Infolgedessen ist die Benutzungszeit des Brennstoffes oder, anders ausgedrückt, die Energie, die aus ihm gewonnen werden kann, verhältnismäßig gering. Natururan-Reaktoren sind außerdem sehr groß und ihre Konstruktion verhältnismäßig kompliziert.

Die Tabellen zeigen, daß man deshalb häufig Brennstoff benutzt, dessen Gehalt an dem spaltbaren Isotop U 235 heraufgesetzt ist. Dafür sind Isotopen-

Trennanlagen erforderlich. Die Isotopentrennung ist schwierig und teuer; sie wirft erhebliche physikalische und technische Probleme auf. Man nutzt dabei den geringen Gewichtsunterschied der beiden Isotope U 235 und U 238 (3 Einheiten, d. h. weniger als 1 %) aus. Die Isotopentrennung wird stets mit Uranhexafluorid (UF_6) durchgeführt, das bei Temperaturen oberhalb etwa 50° C schon gasförmig ist.

Angereichertes Uran wird gegenwärtig fast ausschließlich aus den Vereinigten Staaten bezogen, wo während des letzten Krieges große Isotopen-Trennanlagen für militärische Zwecke entstanden. Den Bezug des angereicherten Urans für friedliche Zwecke ermöglicht ein bilateraler Vertrag zwischen den USA und der Bundesrepublik; der Bund kauft oder leiht das Material und verpachtet es an die Benutzer weiter.

Der Preis von angereichertem Uran steigt mit dem Grad der Anreicherung stark an. Grundsätzlich ist es wesentlich teurer als natürliches Uran, das man in Form von Erzkonzentraten an mehreren Stellen billig kaufen kann. Die folgende Übersicht zeigt den Preis von angereichertem Uran als Funktion der Anreicherung.

Preise für angereichertes Uran in Form von UF_6
fob amerikanische Trennanlage

Anreicherung Gew. % U-235	DM/kg U (= U 235 + U 238)
0,75	106,—
0,80	122,—
0,90	155,60
1	190,80
2	586,—
3	1.017,20
4	1.463,20
5	1.917,60
6	2.378,—
8	3.308,—
10	4.248,—
20	9.008,—
30	13.824,—
40	18.664,—
50	23.528,—
60	28.412,—
70	33.316,—
80	38.248,—
90	43.232,—

Natürliches Uran aus Erzkonzentrat kostet etwa 40,— DM/kg enthaltenes U frei Bundesrepublik.

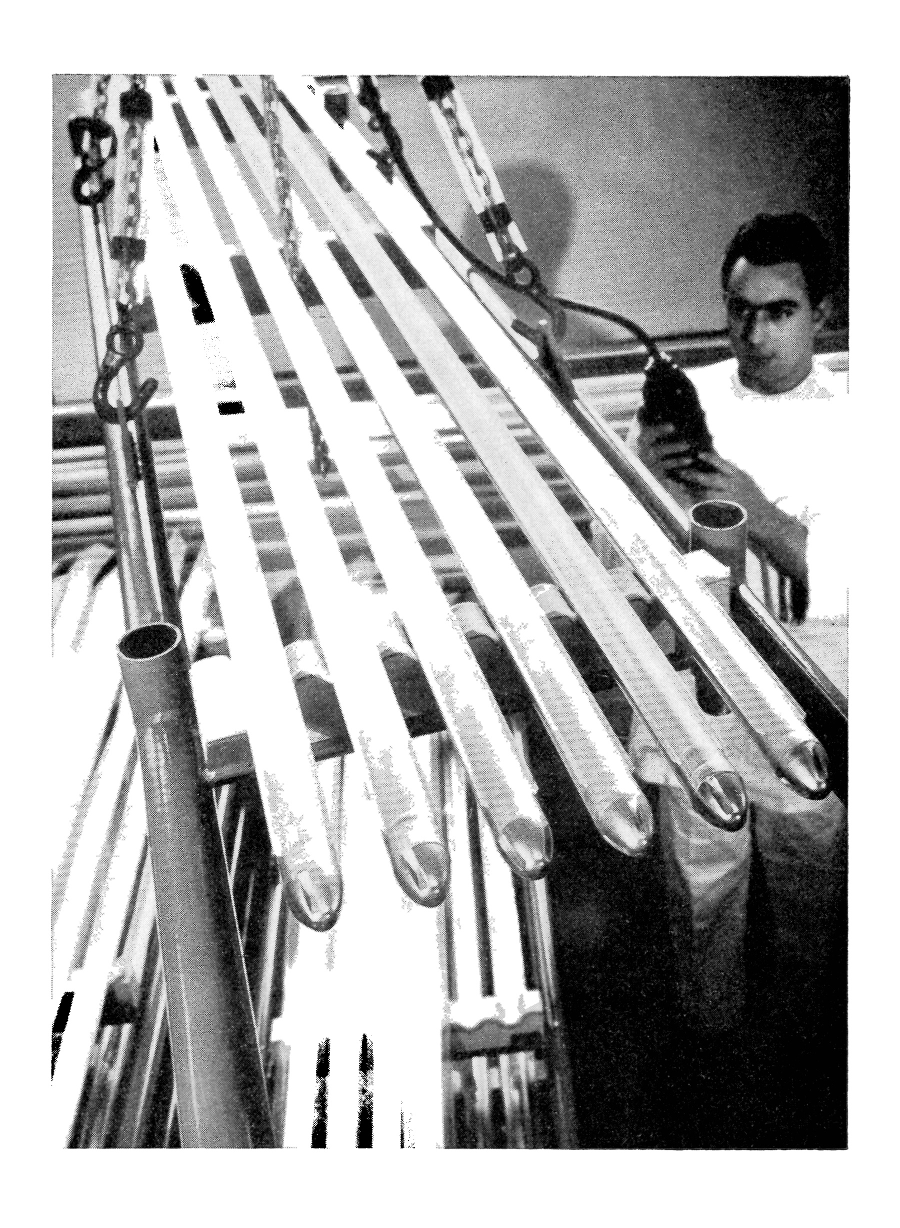


Abb. 2 Brennelemente des Karlsruher Forschungsreaktors FR-2

Aus Tabelle III geht deutlich hervor, daß Kraftreaktoren, bei denen ja der Preis der erzielten Kilowattstunde entscheidend vom Brennstoffpreis beeinflußt wird, natürliches oder schwach angereichertes Uran benutzen. Für Forschungsreaktoren ist nicht in gleichem Maße darauf Rücksicht zu nehmen. Der für sie typische Brennstoff ist die uranarme Uran-Aluminium-Legierung oder das Gemisch von U_3O_8 und Aluminium. Die starke Verdünnung mit Aluminium beseitigt viele unangenehme Eigenschaften der reinen Kernbrennstoffe, schafft also einen unproblematischen, robusten Brennstoff. Diese Vorteile muß man jedoch durch die größeren Kosten für die höhere Anreicherung erkaufen.

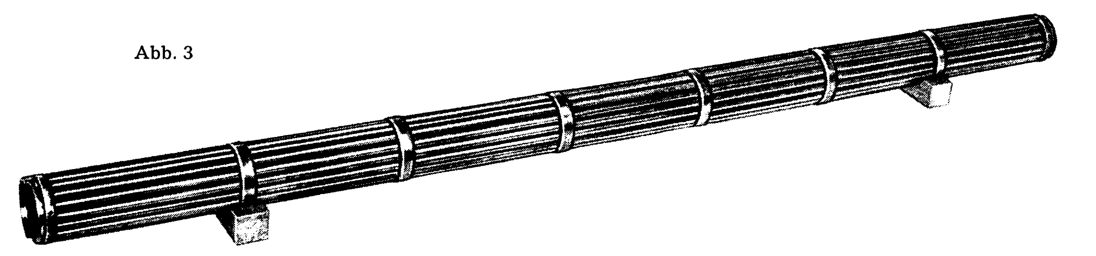
Gestalt eines Brennelements

Brennelemente zeigen vielgestaltige Formen. Da sie ausgewechselt werden müssen und starke Abschirmwände den Reaktorkern umgeben, ist ein Element meist schlank und lang.

Als Beispiel für ein metallisches Element mag das Brennelement des FR-2-Reaktors im Kernforschungszentrum Karlsruhe dienen. Es besteht aus einem Uranstab von etwa 2 m Länge und einem Durchmesser von 32 mm in einer Hülse aus Aluminium (Abb. 2). Die metallischen Elemente der englischen und französischen gasgekühlten Reaktoren zeigen einen ähnlichen Aufbau. Auch sie bestehen aus natürlichem Uran. Ihr Durchmesser ähnelt dem der FR-2-Elemente; sie sind jedoch kürzer (30–100 cm), was auf die andersartige Beschickung dieser Reaktoren zurückzuführen ist.

Nimmt man anstatt Uranmetall als Brennstoff Uranoxyd, so muß die erheblich geringere Wärmeleitfähigkeit dieses Brennstoffes berücksichtigt werden. Je geringer die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes ist, desto höhere Temperaturen treten in ihm unter sonst gleichen Bedingungen auf. Sollen sie nicht zu hoch werden, so muß man möglichst dünne Einheiten wählen. Ein oxydisches Element ist deshalb stets ein Büdel verhältnismäßig dünner Einzelstäbe. Abb. 3 zeigt ein solches Element; es handelt sich dabei um das

Abb. 3



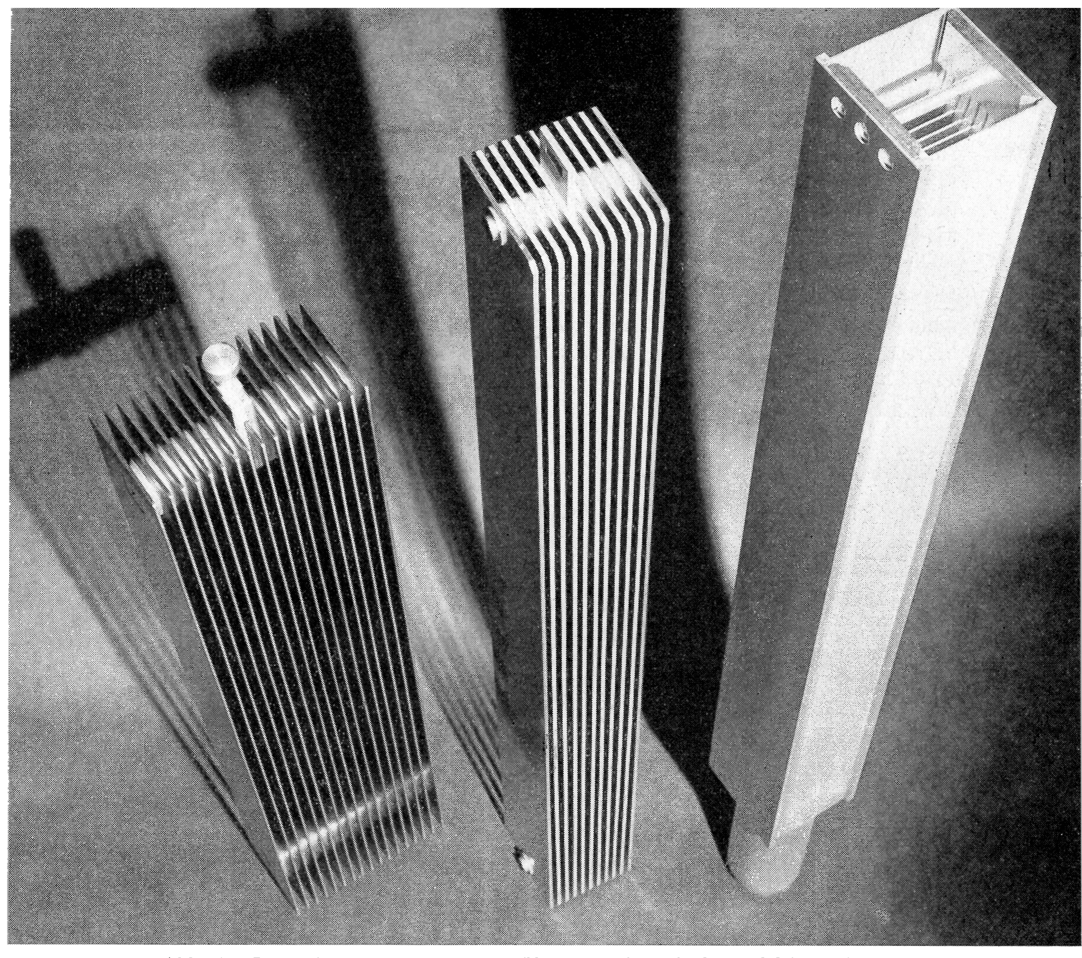


Abb. 4 Brennelemente in Form von Plattenbündeln. Links und Mitte Elemente von Argonautreaktoren, rechts ein Element vom Typ MTR (Material-Test-Reactor) für einen Schwimmbadreaktor.

Brennelement des MZFR-Reaktors (Nr. 17 der Tabelle III). Ein starres Bündel von 37 Metallrohren enthält im Innern der Rohre kleine gesinterte Tabletten aus UO_2.

Bei einem Schwimmbadreaktor besteht die Abschirmung aus einer mehrere Meter hohen Wasserschicht. Der Kern des Reaktors läßt sich also während des Betriebs überwachen. Die Elemente können von einer über dem Becken angeordneten Bühne aus mit Hilfe von Greifern ausgewechselt werden. Elemente für diese Reaktoren bezeichnet man als MTR-Elemente (Material-Test-Reaktor). Ein solches Element stellt ein Bündel dünner Platten dar. Jede Platte ist etwa 1 mm stark (Abb. 4, rechts). 10 bis 20 solcher Platten werden

zu einem Bündel vereinigt. Elemente dieser Art werden bei den Reaktoren 3–5 (Tabelle II) verwendet. Der DIDO-Reaktor (Nr. 2 der Tabelle II) besitzt ebenfalls ein Plattenbündel dieser Art; es setzt sich jedoch in einem komplizierten Kopfstück fort.

Auch Argonaut-Reaktoren (Nr. 7–9 der Tabelle II) sind mit Plattenbündeln als Brennelementen ausgestattet. Da die Leistung bei diesen Reaktoren klein ist, entfällt eine Kühlung in strömendem Wasser. Deshalb muß das Plattenbündel nicht wie bei Schwimmbadreaktoren in einem Kasten eingebaut sein. Zwei Brennelemente für Argonaut-Reaktoren sind auf Abb. 4, links, dargestellt.

Ein von den bisher behandelten Brennelementformen völlig abweichendes und daher überraschendes Bild bietet das Element für den Hochtemperatur-Reaktor der AVR in Jülich (Abb. 5). Der Kern dieses Reaktors besteht aus

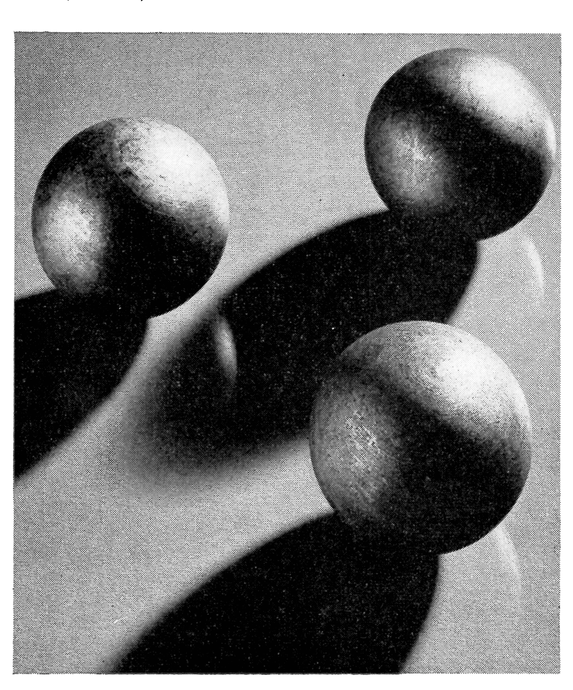


Abb. 5
Brennelemente des AVR-Reaktors in Jülich. Die Graphitkugeln von 60 mm Durchmesser enthalten im Innern den Kernbrennstoff in Form von Urancarbid

einem Kugelhaufen von etwa 100.000 Graphitkugeln mit einem Durchmesser von 6 cm. Einige 10.000 dieser Kugeln besitzen im Innern als Brennstoff Urancarbid. Die Elemente werden dem Reaktorkern zugeführt oder entzogen, indem man sie ein- oder ausrollen läßt.

Diese Übersicht über die Gestalt der Brennelemente in deutschen Reaktoren kann zwar die Vielfalt der heute in der Welt vorhandenen Elemente nicht erschöpfend darstellen. Die wichtigsten und gebräuchlichsten Typen sind jedoch aufgeführt.

Besonderheiten bei der Herstellung von Kernbrennstoffen und -brennelementen

Reinheit – Strahlung – Kritikalität

Bei der Herstellung von Kernbrennstoffen (also von reinem oder legiertem Uranmetall in Form von Barren, Uranoxyd, UO_2 oder U_3O_8, in Pulverform und Urancarbid z. B. ebenfalls in Form eines Pulvers) werden die normalen, in der anorganisch-chemischen Industrie benutzten Methoden angewendet. Als Ausgangsprodukte dienen dabei entweder Uranerzkonzentrate, wenn es sich um natürliches Uran, und Uranhexafluorid, UF_6, wenn es sich um angereichertes Uran handelt. Auch die Weiterverarbeitung der Brennstoffe zu Brennelementen folgt bekannten Methoden.

Es sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten, die Brennelementfabriken von anderen konventionellen Betrieben unterscheiden und als Nuklearbetriebe kennzeichnen.

Reinheit

Mit den Brennelementen muß in einem Reaktor die Kettenreaktion der Kernspaltung aufrechterhalten werden. Unter den möglichen Verunreinigungen im Kernbrennstoff befinden sich unter Umständen starke Neutronen-„Gifte" (vor allem Bor oder Cadmium), die Neutronen einfangen und sie damit der Kettenreaktion entziehen. Solche „Gifte" dürfen also nur in geringen Mengen vorhanden sein. Deshalb müssen die Kernbrennstoffe einen Reinheitsgrad aufweisen, wie er bisher in der Industrie kaum gefordert wurde. Der Anteil der Gifte muß unter 1/10 bis 1/100 ppm (ppm = part per million = 10^{-4} %) liegen. So darf z. B. 1 kg Uranmetall nur 1/10 bis 1/100 mg Bor enthalten, wenn das Uran als Kernbrennstoff verwendet werden soll.

Die Verarbeitung muß deshalb zunächst mit einer Reinigung beginnen und in allen weiteren Stufen so erfolgen, daß keine Verunreinigungen über ein vertretbares Maß hinaus eingeschleppt werden. Diese Reinigung erfolgt meist durch eine Extraktion des gelösten Uranerzkonzentrates mit einem organischen Lösungsmittel. Hexafluorid, das als Ausgangsprodukt für die Herstellung von Brennelementen mit angereichertem Uran dient, ist allerdings meist schon genügend rein, so daß auf eine weitere Reinigung verzichtet werden kann.



Abb. 7

Uranerzkonzentrat, sogen. „Yellow cake“.

S t r a h l u n g

Fast unabhängig von seiner Anreicherung ist frisches Uran nur schwach radioaktiv. Zwar bilden sich durch den normalen radioaktiven Zerfall hochaktive Folgeprodukte, etwa Radium. Sie werden jedoch schon bei der Erzkonzentration, die an der Grube erfolgt, oder bei der Reinigung in der eigentlichen Produktionsstätte für Brennstoffe entfernt. Zwar bilden sich diese Folgeprodukte langsam wieder nach, doch bleibt die Aktivität der zu verarbeitenden Produkte in geringen Grenzen. Daher gibt es in einer Fabrik zur Herstellung von Brennelementen auch keine dicken Bleiwände, hinter denen das Uran gehandhabt würde.

Eine hohe Radioaktivität gewinnt Uran erst durch den Einsatz in den Reaktor als Folge der stark strahlenden Spaltprodukte, also der Kerntrümmer, die bei der Kernspaltung entstehen. Die Handhabung b e s t r a h l t e n Urans, etwa seine chemische Aufarbeitung, muß deshalb eine sehr hohe Radioaktivität berücksichtigen und hinter dicken Abschirmungen vor sich gehen. Anlagen dieser Art unterscheiden sich grundsätzlich von denen, die unbestrahltes Uran verarbeiten. Beim Umgang mit pulverförmigen Uranverbindungen, etwa beim Sintern von UO_2, muß dafür gesorgt werden, daß keiner der Beschäftigten mehr Staub als zuträglich einatmet. Das trifft auch für das Arbeiten mit anderen anorganischen Verbindungen zu. Staubabsaugungen, Staubschutz, Staubmasken und unter gewissen Voraussetzungen ein Hantieren in Handschuhkästen gelten als geeignete Sicherheitsmaßnahmen.

K r i t i k a l i t ä t

Die Brennelemente werden im Reaktor zu einer kritischen Einheit zusammengesetzt. Zwischen den Elementen befindet sich meist ein Moderator, also etwa Graphit oder Wasser. Natürliches, nicht angereichertes Uran kann ohne einen solchen Moderator nicht kritisch werden. Anders verhält sich angereichertes Uran. Hier muß man mit steigender Anreicherung immer sorgfältiger darauf achten, daß bei keinem der Verarbeitungsschritte eine kritische Anordnung zusammengestellt wird. Transportbehälter für angereichertes Uran berücksichtigen diese wichtige Tatsache (Abb. 6). Um einen rohrförmigen Behälter befindet sich ein Abstandskäfig (mit „bird-cage" = Vogelkäfig bezeichnet), der so konstruiert ist, daß sich die Behälter mit angereichertem Uran stets in einem sicheren Abstand voneinander befinden.

Durch die mit der Kritikalität verbundenen Probleme gewinnt eine Verarbeitungsstätte für hochangereichertes Uran mehr oder weniger den Charakter eines Laboratoriums. Alle Arbeitsvorgänge müssen in Behältern vorgenommen werden, die überkritische Mengen mit Sicherheit ausschließen. Jeder einzelne Arbeitsschritt muß vorher genau überlegt und berechnet werden und unterliegt einer dauernden Kontrolle durch geschultes Personal.

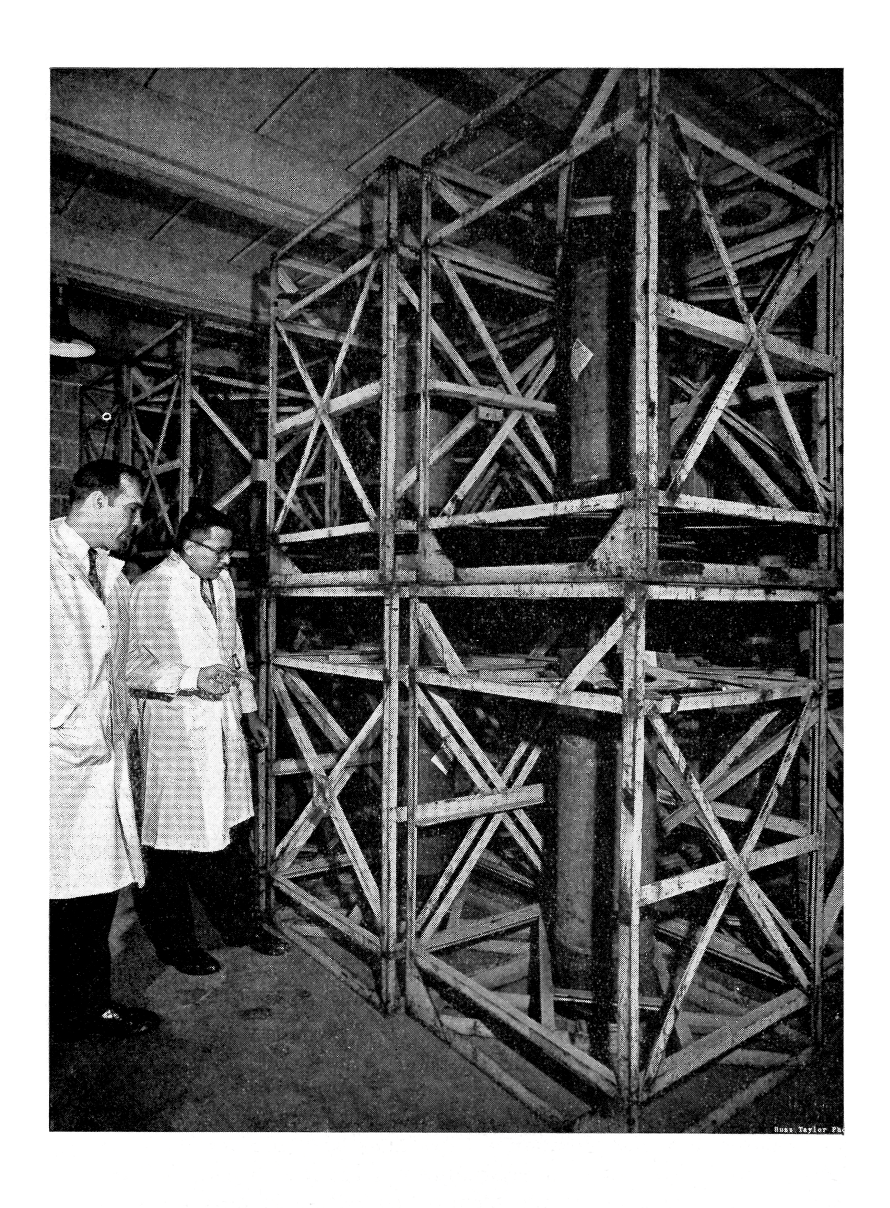


Abb. 6 Transportbehälter für angereichertes UF_6. Um die Druckflasche herum befindet sich ein Abstandskäfig („bird cage“).

Herstellung der Kernbrennstoffe

Zur Herstellung der hochreinen Kernbrennstoffe wie sie für die weitere Verarbeitung zu Brennelementen benötigt werden, dienen bestimmte chemische Umsetzungen. Als Ausgangsmaterialien verwendet die Brennelementfabrik bei natürlichem Uran Erzkonzentrat und bei angereichertem Uran Uranhexafluorid.

Natürliches Uran

Vom Erzkonzentrat zu den verschiedenen Kernbrennstoffen

Die meist verhältnismäßig armen Uranerze werden dort, wo sie gewonnen werden, zu einem Erzkonzentrat mit einem Gehalt von etwa 70–80 % Uran verarbeitet. Dieses Erzkonzentrat, das chemisch z. B. annähernd die Zusammensetzung von Ammoniumdiuranat $(NH_4)_2U_2O_7$ besitzen kann, kommt in Form grober Brocken in Blechtrommeln zum Versand. Es ist meist ein gelbes Produkt und wird dann mit „yellow cake" bezeichnet (Abb. 7, vor S. 33).

Der erste Schritt bei der Weiterverarbeitung ist stets die Reinigung, die fast immer als Extraktion durchgeführt wird. Das Erzkonzentrat wird zunächst in Salpetersäure gelöst, wobei das leicht lösliche Uranylnitrat $UO_2(NO_3)_2$ entsteht:

$$(NH_4)_2U_2O_7 + 6\,HNO_3 \rightarrow 2\,UO_2(NO_3)_2 + 2\,NH_4NO_3 + 3\,H_2O$$

Aus dieser Lösung wird das Uran mit einem organischen Lösungsmittel extrahiert. Das Prinzip dieser Extraktion kennen wir vom chemischen Labor her. Eine organische Flüssigkeit, die sich nicht mit Wasser mischen darf und die das Uranylnitrat leichter löst als Wasser, wird über die wässrige Lösung in einem Schütteltrichter geschichtet. Durch Schütteln werden beide Flüssigkeiten durcheinandergemischt, wobei die organische bevorzugt das Uran aufnimmt und die Verunreinigungen zurückläßt. Wenn sich der leichtere organische Anteil wieder vom spezifisch schwereren Wasser abgesetzt hat, kann man beide leicht trennen.

In der Praxis überträgt man dieses Prinzip z. B. auf kontinuierliche Extraktionskolonnen, wie sie in Abb. 8 dargestellt sind. Bewegliche Böden im Innern der Kolonnen sorgen für eine dauernde gute Durchmischung. Als organisches Extraktionsmittel nimmt man sehr häufig Tributylphosphat (abgekürzt: TBP). Die Wirkung einer richtig gelenkten Extraktion kann man aus der folgenden Aufstellung ersehen. Sie enthält Beispiele für den Verunreinigungsgrad in einem Erzkonzentrat und in der daraus durch Extraktion gewonnenen hochreinen Uranylnitratlösung.

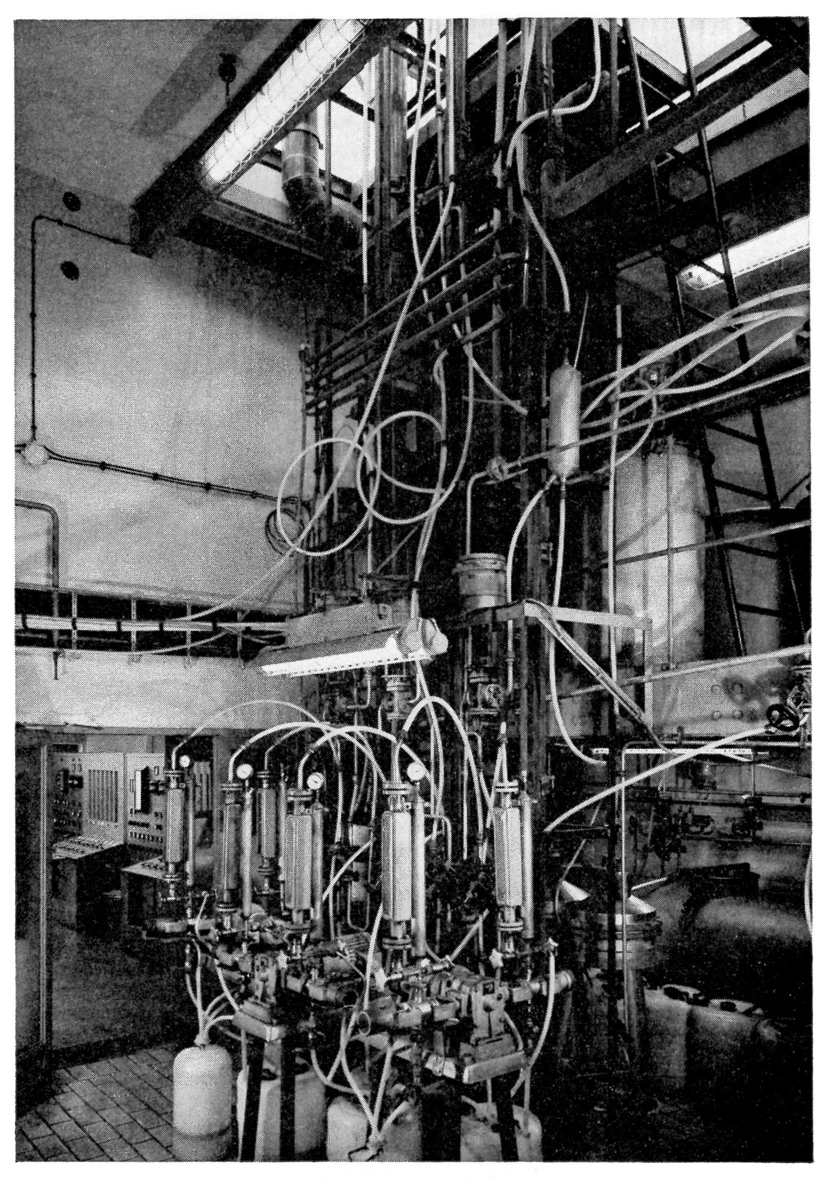


Abb. 8 Extraktionsanlage für natürliches Uranylnitrat. Die 3 senkrecht stehenden Extraktionskolonnen werden hinter den Leitungen und Armaturen sichtbar.

Element	Konzentrat in ppm	Uranylnitratlösung nach der Extraktion in ppm
Bor	1,6	0,1
Cadmium	0,1	0,1
Mangan	109	1
Nickel	76	1,5
Kupfer	10	2
Chrom	24	1
Eisen	5650	1
Molybdän	39	1,5
Aluminium	2400	34
Phosphor	3000	7
Silizium	nicht analysiert	31
Gadolinium	"	0,04
Europium	"	0,04
Erbium	"	0,08
Disprosium	"	0,08

(Bor, Cadmium, Gadolinium, Europium und Disprosium sind ausgeprägte Neutronengifte)

Nach dieser Extraktion liegt das reinste Produkt des gesamten Herstellungsganges vor. Man muß sorgfältig darauf achten, daß es durch die weiteren Verarbeitungsschritte nicht wieder in unzulässiger Weise verunreinigt wird. Aus der hochreinen Uranylnitratlösung gewinnt man das Uran durch eine Fällung in fester Form zurück. Ein vielverwendetes Fällungsmittel ist Ammoniak:

$$2\,UO_2(NO_3)_2 + 6\,NH_3 + 2\,H_2O \rightarrow (NH_4)_2U_2O_7 + 4\,NH_4NO_3$$

Der leuchtend gelbe Niederschlag, den man mit ADU (Abkürzung für Ammoniumdiuranat) bezeichnet, wird von der Flüssigkeit getrennt, auf Bleche gefüllt und zunächst in einem Ofen getrocknet, damit er rieselfähig wird.

Die weiteren Verarbeitungsschritte enthalten chemische Umsetzungen an Pulvern. Diese Umsetzungen können z. B. in Drehrohröfen erfolgen (Abb. 9): Das Innere eines leicht geneigten Rohres wird mit dem Pulver beschickt. Bei langsamem Rotieren wird das Produkt in einer festgelegten Zeit durch das Rohr gefördert. Ein Ofen bringt das Rohr auf die gewünschte Temperatur. Auf diese Weise wird als erster Reaktionsschritt eine Kalzination durchgeführt. Dabei werden Ammoniak und Wasser ausgetrieben und je nach der angewendeten Temperatur UO_3 oder U_3O_8 gebildet.

$$(NH_4)_2U_2O_7 \rightarrow 2\,UO_3 + 2\,NH_3 + H_2O$$

(orangerot)

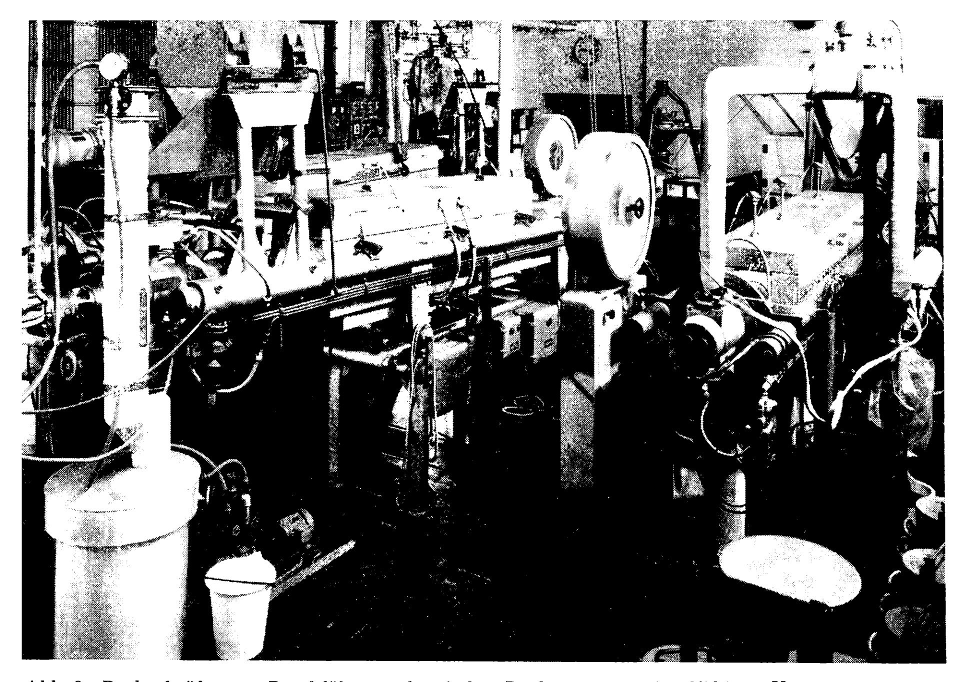


Abb. 9 Drehrohröfen zur Durchführung chemischer Reaktionen an rieselfähigen Uranverbindungen. In den 3 dargestellten Öfen werden aneinander anschließend die Calcination von ADU zu U_3O_8, dessen Reduktion zu UO_2 und die Hydrofluorierung des UO_2 zu UF_6 durchgeführt.

$$3\,(NH_4)_2U_2O_7 \rightarrow 2\,U_3O_8 + 6\,NH_3 + 3\,H_2O + O_2$$

(dunkelgrün bis schwarz)

Die zweite Reaktionsstufe, die ebenfalls im Drehrohrofen durchgeführt werden kann, ist eine Reduktion mit Wasserstoff bei etwa 600° C. Der Wasserstoff strömt von unten her dem rieselnden Pulver entgegen.

$$UO_3 + H_2 \rightarrow UO_2 + H_2O$$

(braun)

$$U_3O_8 + 2\,H_2 \rightarrow 3\,UO_2 + 2\,H_2O$$

Durch diese Reduktion wird Urandioxyd als wichtiger Kernbrennstoff in Form eines braunen Pulvers gewonnen.

Will man Uranmetall erzeugen, so reduziert man stets das grüne Tetrafluorid UF_4. Als Reduktionsmittel dienen Kalzium- oder Magnesiummetall. Dieser

Reduktionsvorgang erzeugt soviel Wärme, daß das entstehende Uranmetall und das Reaktionsprodukt (Kalzium- oder Magnesiumfluorid, CaF_2 bzw. MgF_2) geschmolzen anfallen und sich bei richtiger Durchführung der Reduktion sauber voneinander trennen. Das hierfür benötigte Urantetrafluorid kann ebenfalls in einem Drehrohrofen durch Reaktion von UO_2 mit entgegenströmender wasserfreier Flußsäure gebildet werden (Hydrofluorierung).

$$UO_2 + 4\,HF \rightarrow \underset{\text{(grün)}}{UF_4} + 2\,H_2O$$

Zur Reduktion wird das UF_4-Pulver mit Kalzium- oder Magnesiumspänen gemischt und in einem keramisch ausgekleideten Reaktionsgefäß durch Zünden zur Reaktion gebracht, die man mit Calciothermie bzw. Magnesiothermie bezeichnet. Die Reaktion läuft dabei sehr rasch nach einer der beiden Gleichungen ab:

$$UF_4 + 2\,Ca \rightarrow U + 2\,CaF_2$$

oder

$$UF_4 + 2\,Mg \rightarrow U + 2\,MgF_2$$

Ein in der Bundesrepublik benutztes Reaktionsgefäß ist in Abb. 10 dargestellt.

Den aus der Schmelze erstarrten Uranbarren bezeichnet man mit Regulus. Abb. 11 (Seite 42) zeigt zwei solcher Reguli, von denen jeder ein Gewicht von etwa 45 kg besitzt.

Schließlich muß noch die Herstellung von Urankarbid (UC) erwähnt werden. Es kann auf verschiedene Weise gewonnen werden, z. B. durch die Reaktion

$$UO_2 + 3\,C \rightarrow UC + 2\,CO.$$

Man mischt zu diesem Zweck z. B. Urandioxyd UO_2 mit Graphitpulver, preßt die Mischung zu Tabletten und läßt sie im Vakuum bei etwa 1700–1800° C reagieren. Das Urankarbid UC entsteht dann in Form poröser Tabletten, die meist durch Schmelzen und Gießen weiterverarbeitet werden. Auf die gleiche Weise kann man auch Urandikarbid UC_2 herstellen, das für den Einsatz in Hochtemperatur-Reaktoren erwogen wird.

Angereichertes Uran

Vom Uranhexafluorid UF_6 zu den verschiedenen Kernbrennstoffen

Als Ausgangsmaterial der Brennstoffherstellung bei angereichertem Material dient Uranhexafluorid UF_6, das die Isotopen-Trennanlagen bereits genügend rein liefern, so daß eine weitere Reinigung nicht notwendig ist. Das Uranhexafluorid kann durch Fluorieren von Urantetrafluorid hergestellt werden:

$$UF_4 + F_2 \rightarrow UF_6$$

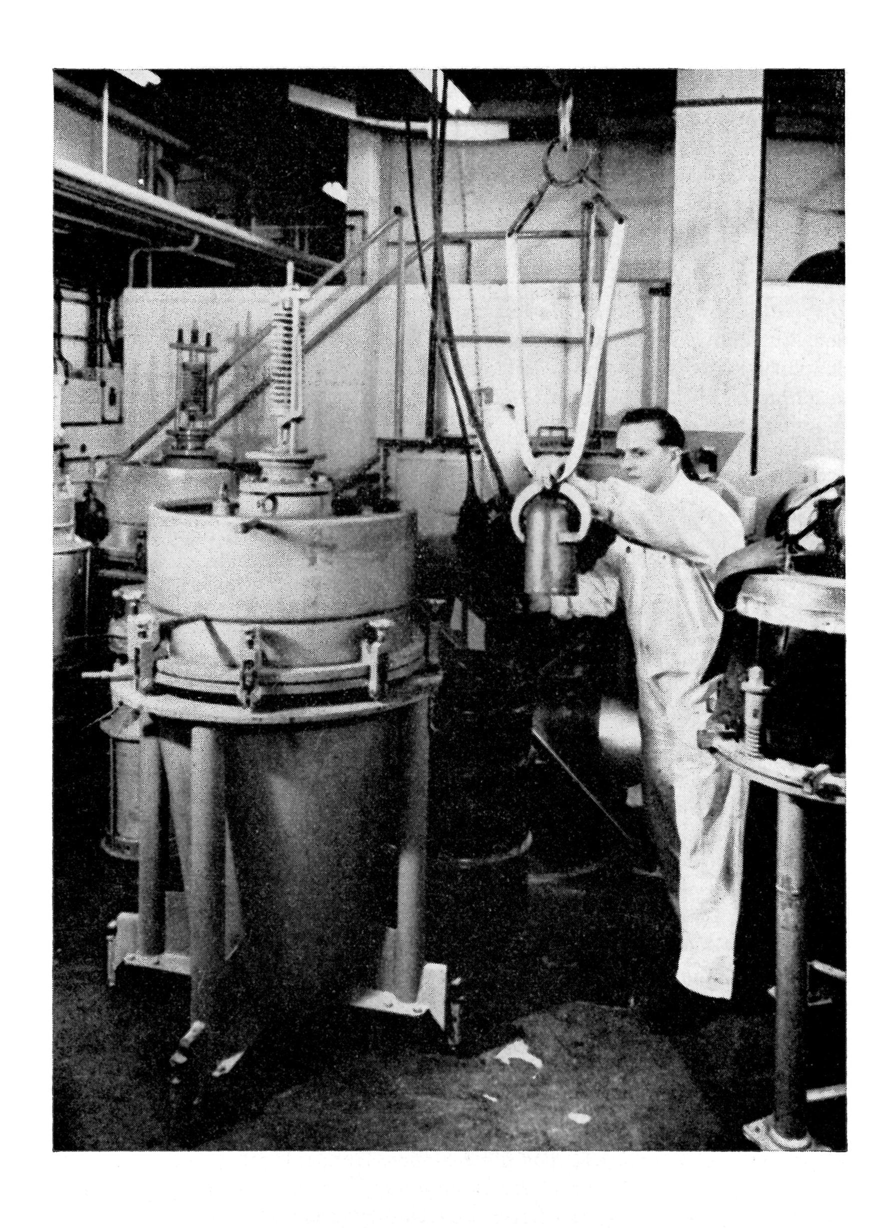


Abb. 10 Reaktionsgefäß zur Durchführung der calciothermischen Reduktion von UF_4 zu Uranmetall. Am Kran ein Uranregulus.

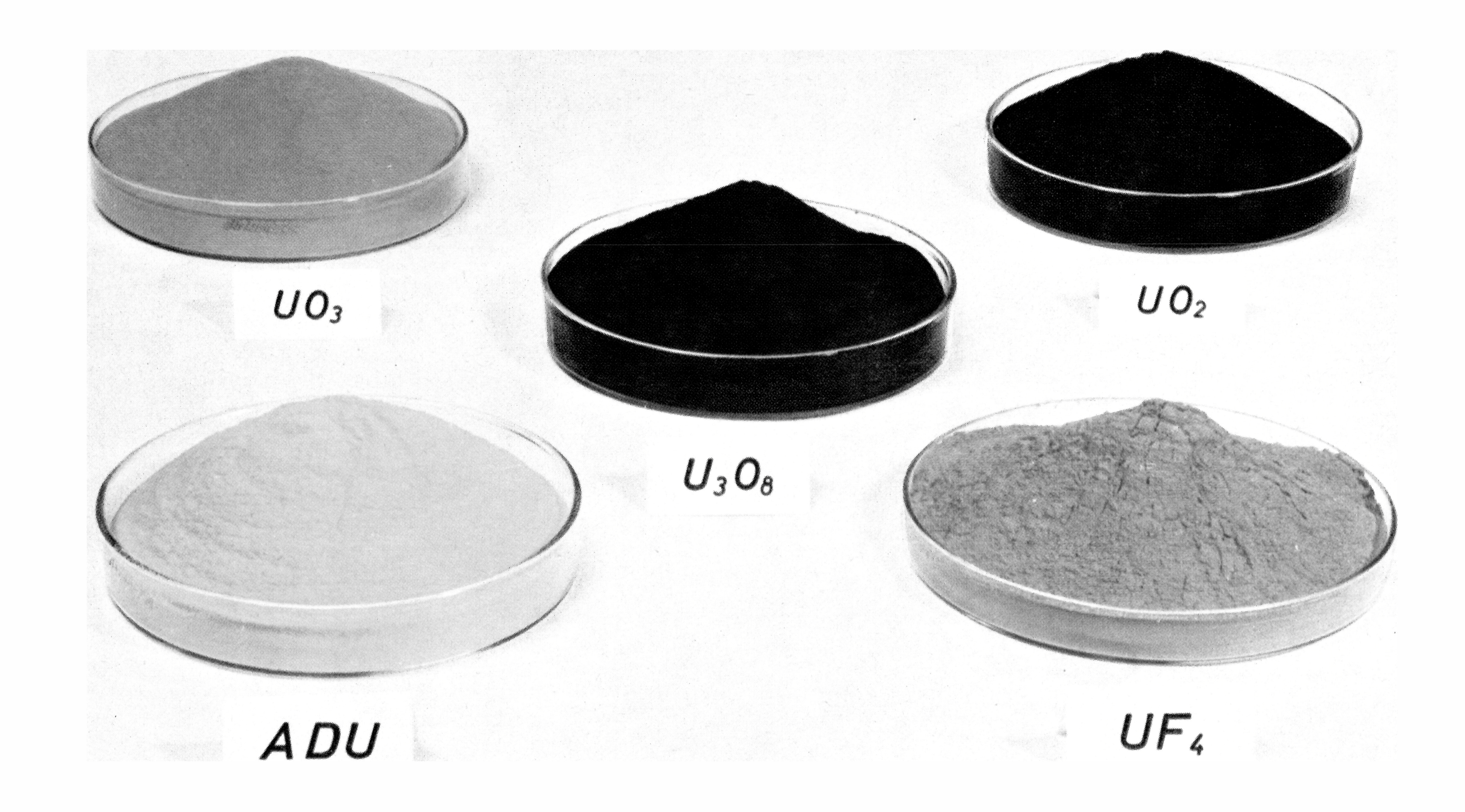

UO_3
U_3O_8
UO_2
ADU
UF_4

Abb. 11

Einige Uranverbindungen: UO_3 = Urantrioxyd, UO_2 = Urandioxyd, U_3O_8 = Triuranoktoxyd, ADU = Ammonium-Diuranat, UF_4 = Urantetrafluorid.

Bei der Isotopentrennung wird das Isotopengemisch in zwei Teile aufgespalten: in angereichertes UF_6 mit einem höheren Gehalt an U 235, als er im Natururan vorhanden ist, und in einen Anteil mit geringerem Gehalt an U 235 (etwa 0,2–0,3 %), dem sogenannten „abgereicherten Uran". Abgereichertes Uran ist für normale Reaktoren als Brennstoff nicht verwendbar. Man kann es in Brutreaktoren benutzen, wo es in spaltbares Plutonium umgewandelt wird. Andere Verwendungsmöglichkeiten werden ebenfalls untersucht. So kann man es z. B. für Abschirmzwecke verwenden, weil es in metallischer Form durch das hohe spezifische Gewicht von etwa 19 g/cm^3 Röntgen- oder Gammastrahlen sehr wirksam abschirmt. Die auf diese Weise bisher gefundenen Möglichkeiten der Verwendung von abgereichertem Uran reichen heute allerdings noch nicht aus, um die bei der Isotopentrennung anfallenden großen Mengen zu verbrauchen.

Das angereicherte Uranhexafluorid ist eine farblose, feste Masse, die schon bei etwa 50° C in Gasform übergeht. Sie wird deshalb in Druckflaschen versandt, wie dies etwa bei kondensierten Gasen geschieht. Die chemische Umwandlung von Uranhexafluorid in die gewünschten, als Kernbrennstoff benutzten Uranverbindungen bezeichnet man als „Konversion". Es gibt viele Verfahren der Konversion. Sie müssen stets den hohen Fluorgehalt berücksichtigen, der nicht ohne technische Kunstgriffe auf harmlose Werte heruntergedrückt werden kann. Meist wird das UF_6 in einem Wasserbad aus der Druckflasche ausgetrieben und in eine wässrige Vorlage eingeleitet, wo es hydrolysiert. Die Umsetzung bei ammoniakhaltiger Vorlage kann man vereinfacht beschreiben:

$$2\,UF_6 + 6\,NH_4OH + H_2O \rightarrow (NH_4)_2U_2O_7 + 4\,NH_4HF_2 + 4\,HF$$

Der gelbe Niederschlag (ADU) enthält einen zu hohen Gehalt an Fluor. Um ihn zu verringern, wird er bei etwa 800° C mit Wasserdampf behandelt (sogen. „Pyrohydrolyse"). Dabei bildet sich U_3O_8; das Fluor wird in Form von Flußsäure, HF, entfernt. Die Weiterverarbeitung erfolgt in ganz ähnlicher Weise, wie sie beim Natururan bereits beschrieben wurde.

Um angereichertes Uranmetall herzustellen, kann man auch in einem neuen Verfahren den Weg vom UF_6 zum UF_4 in einem Arbeitsgang zurücklegen, z. B. durch Reduktion mit ungesättigten Kohlenwasserstoffen:

$$UF_6 + R\text{—}\overset{H}{C}=\overset{H}{C}\text{—}R \rightarrow UF_4 + R\text{—}\underset{F}{\overset{H}{C}}\text{—}\underset{F}{\overset{H}{C}}\text{—}R$$

Die beschriebenen Arbeitsschritte bei der Herstellung natürlicher oder angereicherter Uranverbindungen sind in einem Fließschema (Tabelle I, Seite 60) nochmals zusammengestellt. In diesem Fließschema sind die Farben der Verbindungen aufgeführt. Uranverbindungen besitzen fast durchweg leuchtende Farben. Abb. 11 zeigt einige solcher Uransalze.

Herstellung von Brennelementen

Metallische, oxydische, MTR- und karbidische Elemente

Aus der Fülle der Beispiele sollen vier konkrete Fälle herausgegriffen werden, und zwar je ein Beispiel für metallische, oxydische, MTR- und karbidische Elemente.

1. Herstellung der metallischen Brennelemente für den FR-2-Reaktor in Karlsruhe (Abb. 3)

Ausgangsmaterial für diese Herstellung ist ein Regulus aus dem natürlichen Uranmetall, wie ihn Abb. 12 zeigt. Endziel ist ein Uranstab von

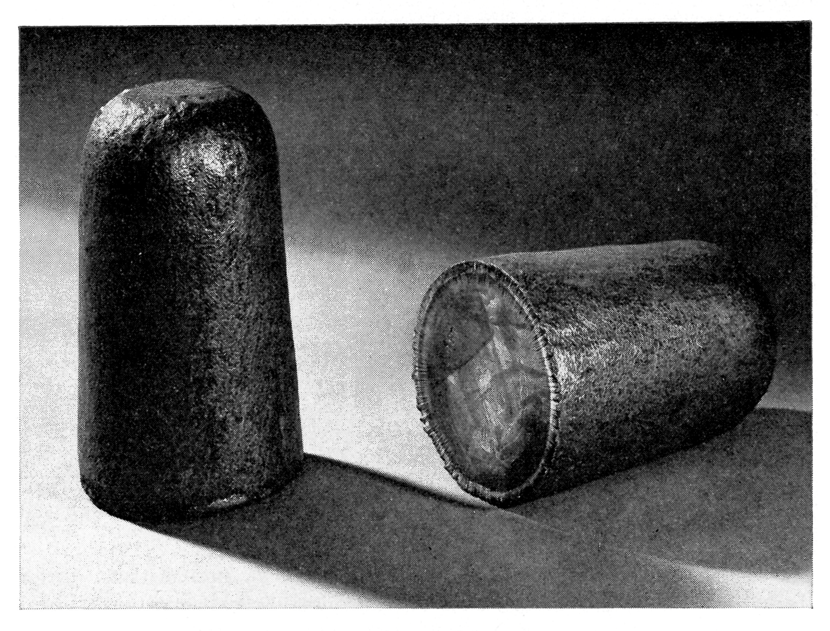


Abb. 12 2 Uranmetallreguli von je etwa 45 kg Gewicht; Durchmesser ca. 12 cm, Höhe ca. 21 cm.

2,16 m Länge und 32 mm Durchmesser, umgeben von einer etwa 1 mm dicken Aluminiumschicht, die drei radiale Rippen von 4 mm Höhe besitzt, um den Uranstab im umgebenden Wasserführungsrohr zu zentrieren.

Die Herstellung dieser Stäbe ist in ihren Einzelheiten nur dann verständlich, wenn einige wichtige Eigenschaften des Uranmetalls beschrieben

werden, besonders das Auftreten von drei allotropen Modifikationen und die Anisotropie von zwei dieser Modifikationen.

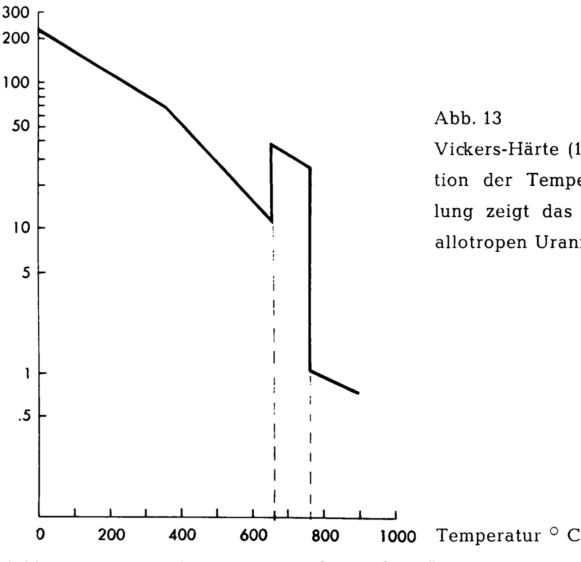


Abb. 13
Vickers-Härte (10 kg Last) als Funktion der Temperatur. Die Darstellung zeigt das Auftreten von drei allotropen Uranmodifikationen.

Allotropie: Abb. 13 zeigt die Vickers-Härte von Uranmetall bei verschiedenen Temperaturen. Jeweils bei etwa 660 und 770° C erkennt man einen deutlichen Sprung im Kurvenverlauf. Bei diesen Temperaturen wechselt das Uranmetall spontan seinen Kristallaufbau. Dabei ändern sich Härte, Dichte und viele andere Eigenschaften.

Wir müssen also unterscheiden (Temperaturen abgerundet) zwischen:

Alpha-Uran	bis 660° C	orthorombisch, anisotrop
Beta-Uran	zwischen 660 und 770° C	tetragonal, anisotrop
Gamma-Uran	zwischen 770 und 1.130° C	kubisch-raumzentriert, isotrop

Schmelzpunkt von Uranmetall: 1130° C

Aus Abb. 13 ist auch ersichtlich, daß Beta-Uran von 700° C härter ist als z. B. Alpha-Uran von 500° C und besonders als Gamma-Uran. Gamma-Uran läßt sich also leicht, Beta-Uran wesentlich schwieriger verarbeiten.

Anisotropie: Als Anisotropie bezeichnet man die Abhängigkeit einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften eines Kristalls von der Richtung im Kristall. Während die meisten Metalle eine isotrope Struktur besitzen, ist Uranmetall in der Alpha- und Beta-Phase anisotrop. Diese Anisotropie kann sich sehr schädlich auswirken.

Ein Metallstück ist normalerweise aus vielen einzelnen Körnern aufgebaut. Beim Alpha-Uran sind innerhalb dieser Körner die Atome in Form von Schichten angeordnet. Die Schichtenabstände werden nun durch Bestrahlung im Reaktor gedehnt, so daß jedes einzelne der mikroskopisch kleinen Körner seine Gestalt ändert. Diese Änderungen heben sich aber normalerweise im Mittel heraus,

machen sich also an einem größeren Stück nicht bemerkbar. Wird Uranmetall nun verformt, z. B. gewalzt, so können sich die einzelnen Körner aber orientieren, und zwar so, daß die Ebenen sich bevorzugt senkrecht zur Stabachse einstellen. Die Dehnung durch Bestrahlung hebt sich nun nicht mehr heraus, vielmehr macht sich die entstandene Vorzugsorientierung (eine sogen. „Textur") durch Wachstum bemerkbar (Abb. 14).

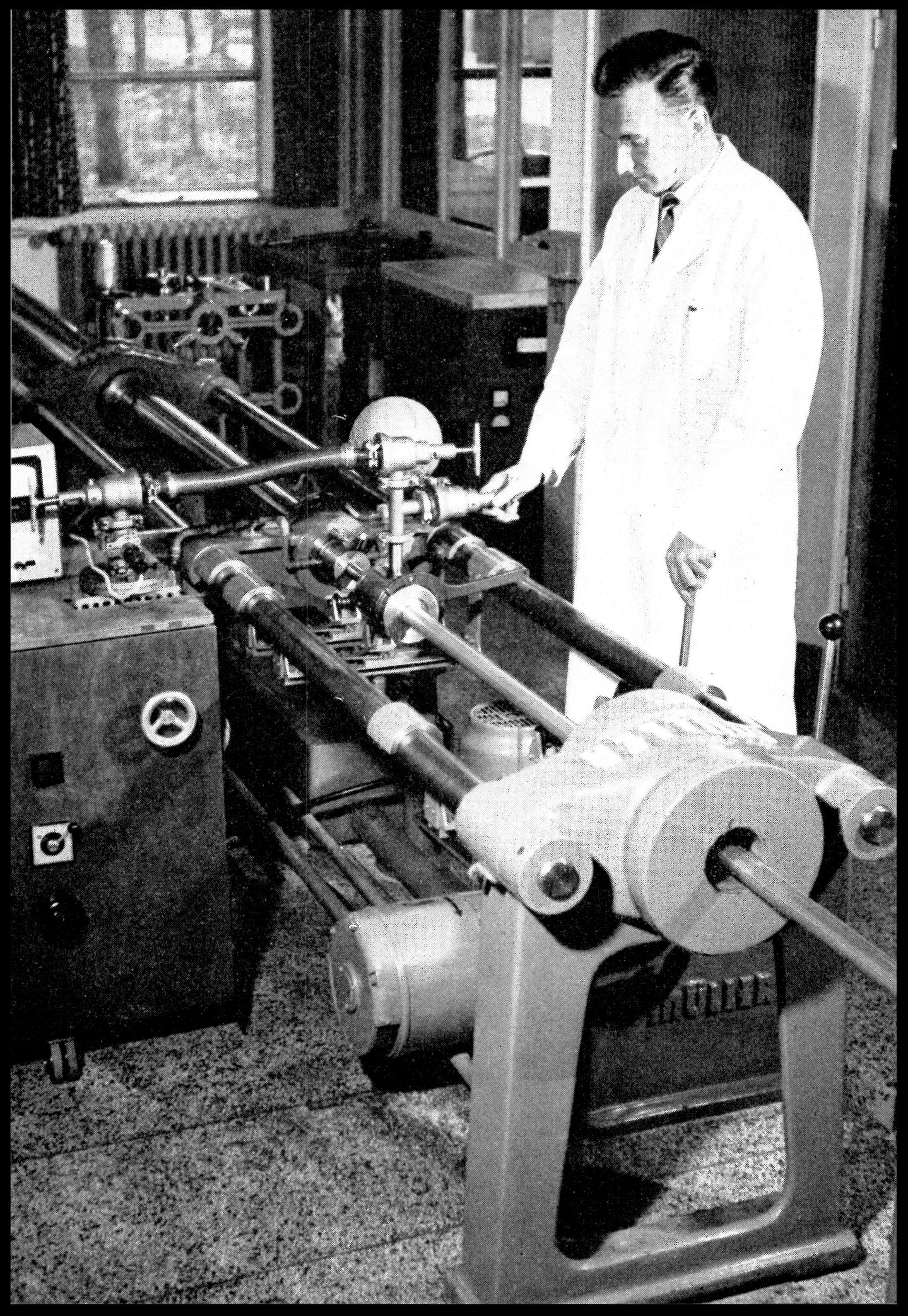
Abb. 14



Eine solche Vorzugsorientierung kann durch Wärmebehandlung beseitigt werden. Wird ein gewalztes Stück Uran auf etwa 700–750° C erhitzt, so muß das ursprüngliche Alpha-Uran in Beta-Uran übergegangen sein, d. h. die Anordnung der Atome ist geändert worden. Beim Abkühlen geschieht das gleiche in entgegengesetzter Richtung. Bei dieser Behandlung vergißt das Uran die alte Vorzugsorientierung. Wenn vor der Wärmebehandlung die Körner so angeordnet waren, daß die einzelnen Schichten des Alpha-Uran-Gitters bevorzugt zur Stabachse ausgerichtet waren, so sind sie nachher willkürlich verteilt, d. h. die Textur ist beseitigt. Zwar wird der Ebenenabstand auch jetzt im Reaktor gedehnt, doch heben sich diese Verlängerungen im Mittel auf. Texturfreies Uran kennt also kein Wachstum mehr im Sinne der Abb. 13. Eine Wärmebehandlung der geschilderten Art erfolgt stets während der Herstellung metallischer Elemente und nicht nur dann, wenn man das Metall durch Walzen verformt hat. Neben einer Beseitigung etwa entstandener schädlicher Texturen kann die Wärmebehandlung auch ein feines Korn herbeiführen. Dies ist ebenfalls eine Voraussetzung für gute Strahlenbeständigkeit.

Die Verformung der Uranreguli zur Herstellung der FR-2-Brennelemente geschieht nicht durch Walzen, sondern durch Strangpressen in der Gammaphase. Abb. 15 (nach S. 48) zeigt den Austritt des rotglühenden Uranstabes (Temperatur zwischen 800 und 1000° C) aus der Strangpresse. Das heiße

Abb. 16 (nebenstehend) Aufpressen der Hülse auf den Uranstab bei der Herstellung der Elemente für den FR-2-Reaktor Karlsruhe. Der Stab mit der Hülse wird durch ein Werkzeug (Vordergrund) gedrückt. Das Innere der Hülse wird dabei evakuiert (Fahrbarer Pumpstand links).



Uranmetall darf hierbei nicht verbrennen, muß also vor Luft geschützt werden. Zu diesem Zwecke kann die Oberfläche etwa mit einem Film geschmolzenen Salzes bedeckt werden. Wenn der Strang erkaltet ist, wird das Salz mit warmem Wasser abgewaschen. Der so hergestellte Stab wird vom Preßkopf befreit und gerichtet, um anschließend in geschmolzenes Salz von etwa 700° C getaucht und in Wasser abgeschreckt zu werden. Zur Beseitigung der bei dieser Wärmebehandlung entstehenden Spannungen wird er schließlich etwa 1 Stunde lang bei etwa 600° C im Vakuum getempert. Nun wird der Stab auf der Drehbank abgedreht und dabei von den Oxydschichten befreit, die sich bei der Verformung und bei der Wärmebehandlung auf der Oberfläche gebildet haben. Durch dieses Abdrehen wird der Durchmesser mit einer Genauigkeit von etwa ± 0,05 mm eingestellt. Die Oberfläche des frisch bearbeiteten Urans ist silberweiß. Nach und nach überzieht sie sich jedoch mit einer erst bläulich schimmernden, dann braunen und schließlich schwarzen Oxydhaut.

Abb. 17 Ultraschallprüfung eines Uranstabes. Der Stab befindet sich im Wasserbehälter.

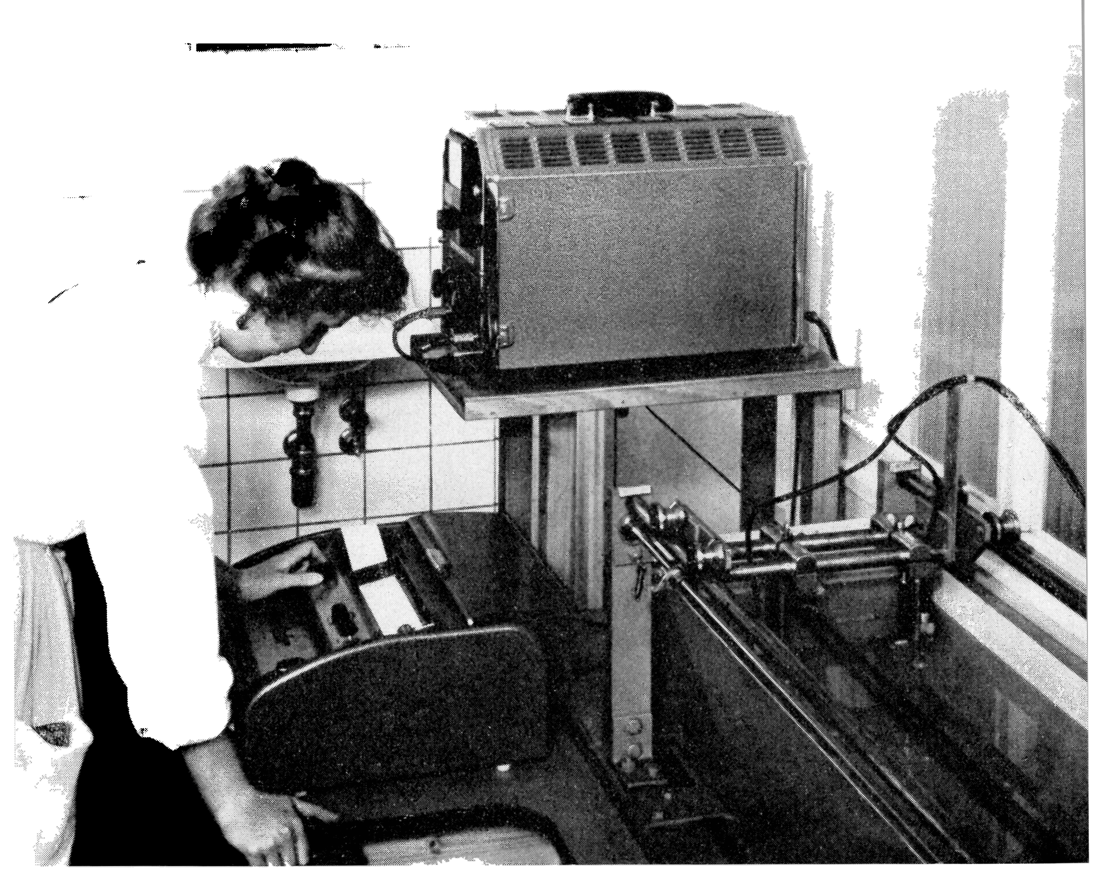




Abb. 18 Dichtheitsprüfung am einseitig verschlossenen Hüllrohr. Das Rohr ist an eine Vakuumapparatur angeschlossen; es wird von außen mit Heliumgas, das sich in der Gummiblase befindet, besprüht.

Während dieser Produktionsstufen werden die Aluminiumhüllrohre vorbereitet. Sie werden entgratet, sorgfältig auf Schäden untersucht, gebeizt und schließlich einseitig mit einem Aluminiumdeckel verschweißt. Der Uranstab wird nun hineingesteckt und die Aluminiumhülse auf den Stab aufgepreßt (Abb. 16, Seite 45). Danach wird der zweite Deckel aufgeschweißt. Nach sorgfältiger Oberflächenbehandlung, die auch eine Eloxierung einschließt, ist das Element fertiggestellt und wird in einem Plastiksack zum Versand an die Reaktorstation eingeschweißt. Dieser Herstellungsgang mußte stark vereinfacht wiedergegeben werden. Er ist in Wirklichkeit komplizierter.

Schließlich sollen noch einige während der Herstellung angestellte Prüfungen erwähnt werden. Eine Ultraschallprüfung (Abb. 17) untersucht den Stab vor dem Umhüllen auf Hohlräume oder Einschlüsse. Auch eine

metallographische Untersuchung wird angestellt: An einem abgeschnittenen Probestück wird ein Metallschliff angefertigt, der Auskunft darüber gibt, ob das Metall das gewünschte feine und regelmäßige Korngefüge aufweist. Wichtig sind schließlich ganz besonders Prüfungen auf die Dichtheit der Hülse besonders der Schweißnähte.

Für eine solche Prüfung verwendet man in der Kerntechnik häufig den Heliumlecktest (Abb. 18). Das leere, einseitig verschweißte Hüllrohr wird geprüft, indem man es in eine Vakuumapparatur einspannt und das in ihm befindliche Gas absaugt. Das abgesaugte Gas wird über einen Heliumlecksucher geleitet – ein empfindliches Massenspektrometer, das auf die Aufspürung von Helium eingestellt ist. Mit einer feinen Düse besprüht man die Außenseite des Rohres, besonders die Schweißnaht, mit Helium. Wird durch ein Leck Helium in das Innere gesaugt, so zeigt es der Heliumlecksucher rasch und sicher an. Auch die zweite Schweißnaht kann man auf diese Weise prüfen, wenn man vor dem Anbringen der zweiten Schweißnaht eine kleine Menge Helium in das Innere des Elements eingebracht hat. Ein Leck in der zweiten Schweißnaht würde sich wiederum dadurch verraten, daß Helium nach außen gelangt und vom Lecksucher angezeigt werden kann. Läßt sich Helium auf diese Weise außerhalb des Elements nicht nachweisen, so ist die Schweißnaht vakuumdicht.

2. Herstellung der oxydischen Brennelemente für den Mehrzweckforschungsreaktor (MZFR) im Kernforschungszentrum Karlsruhe (Abb. 3)

Das Brennelement des Mehrzweckforschungsreaktors besteht aus 2 übereinanderstehenden Bündeln von je 37 einzelnen Rohren, in denen sich je eine Säule aus gesinterten UO_2-Tabletten befindet. Das einzelne Bündel hat eine Länge von etwa 1,80 m. Der Innendurchmesser der Rohre beträgt 10,5 mm. Sie bestehen aus Zircaloy-2, einer Zirkonlegierung mit etwa 1,5 % Zinn und geringen weiteren Zusätzen an Nickel, Eisen und Chrom. Wie beim FR-2-Reaktor benutzt man auch hier Natururan. Ausgangsprodukt für die Herstellung der Elemente ist das braune, nuklearreine UO_2-Pulver, wie es durch Reduktion von UO_3 bzw. U_3O_8 mit Wasserstoff anfällt. Um das feinkörnige UO_2-Pulver gut rieselfähig zu machen und die Reibung in der Preßform zu verringern, setzt man ihm organische Substanzen (etwa Stearinsäure) zu. Auf diese Weise kann man erreichen, daß sich ein Pulvergranulat mit einer Korngröße zwischen etwa 0,1 und 1 mm bildet, das leicht in die automatisch arbeitende Presse nachfließt. Die Presse gibt dem Pulver die gewünschte geometrische Form. Sie verdichtet auf etwa 5–6 g/cm³. Der so entstehende Preßkörper wird als „Grünling“ bezeichnet. Durch den anschließenden Sinterprozeß wird die Dichte des Grünlings auf etwa 10,5–10,7 g/cm³, d. h. nahezu auf das Doppelte erhöht. Beim Sintern

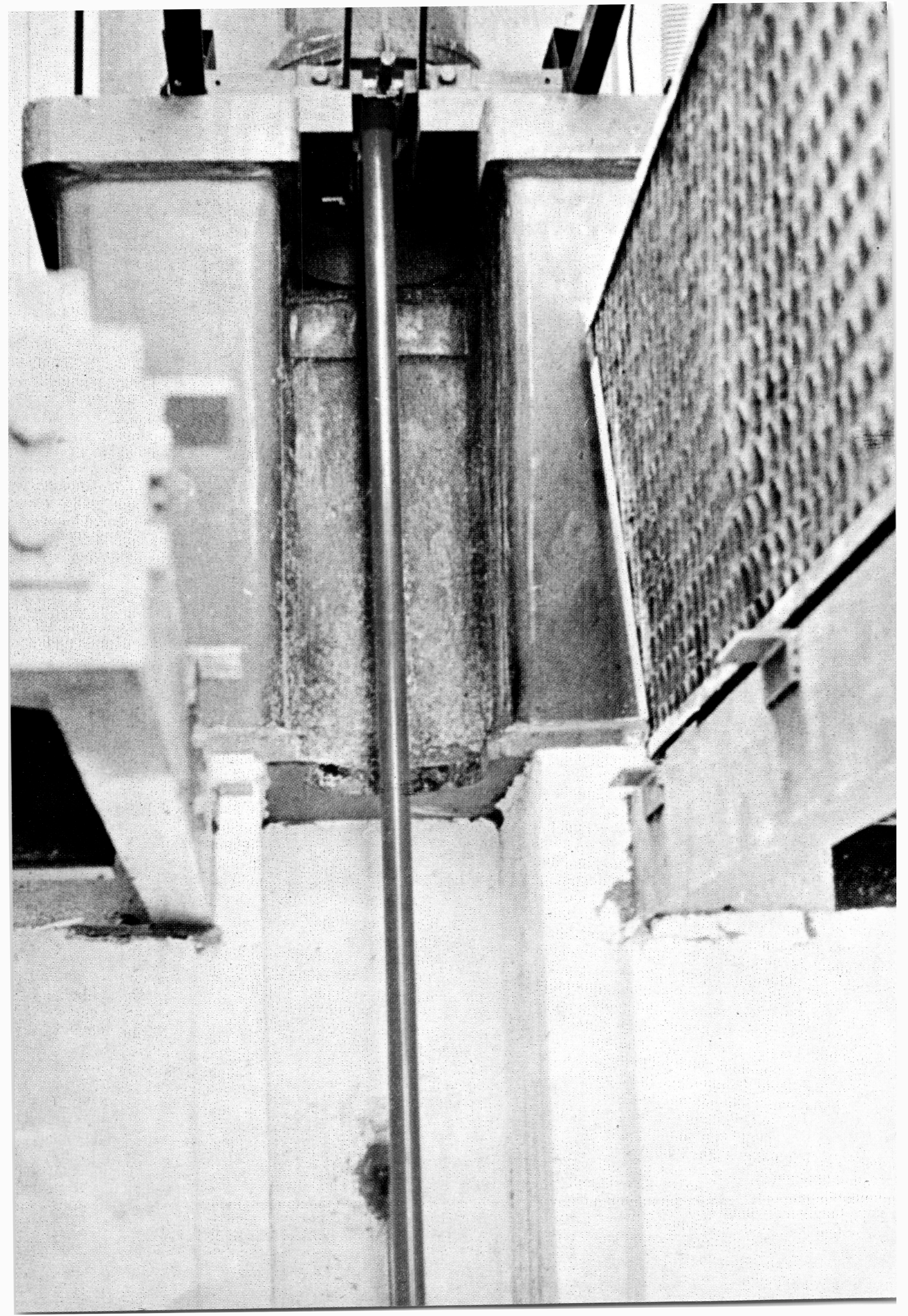


Abb. 15

Gamma-Strangpressen von Uranmetallstäben. Der rotglühende Strang des Metalls verläßt die Presse.

tritt also ein starker Schwund ein. In Abb. 19 ist jeweils links der Grünling und rechts der daraus entstehende Sinterkörper dargestellt. Man erkennt deutlich, wie sich sowohl Höhe als auch Durchmesser der UO_2-Tabletten durch das Sintern verringern. Die Bedingungen des Pressens und Sinterns müssen, nachdem sie einmal experimentell ermittelt wurden, genau eingehalten werden, wenn man die gewünschten Endmaße erhalten will. Außerdem muß man die Eigenschaften des eingesetzten UO_2-Pulvers genau kennnen und fortwährend sorgfältig kontrollieren.

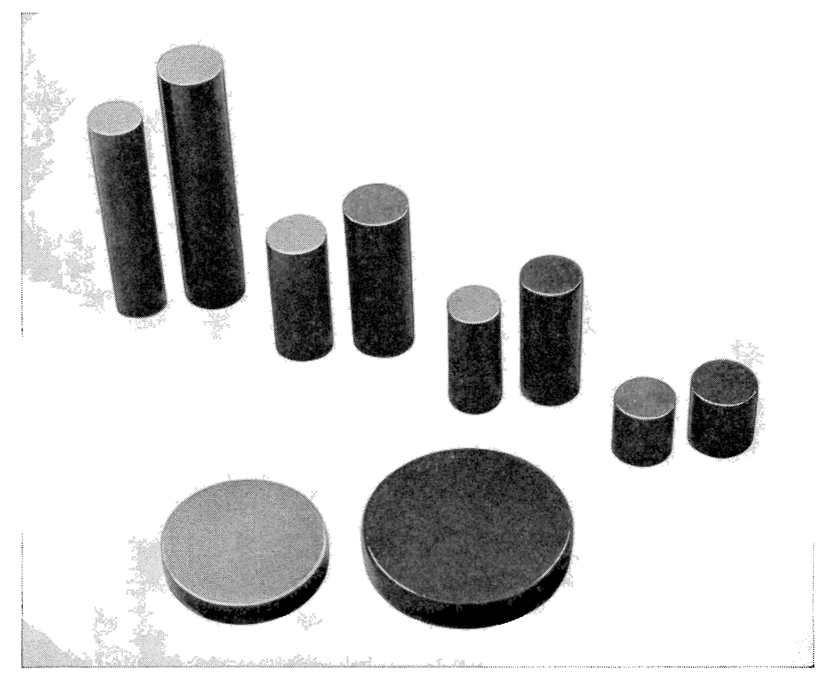


Abb. 19 Größenvergleich von Grünlingen mit daraus hergestellten Sinterkörpern. Der starke Schwund beim Sintern wird deutlich sichtbar. Rechts jeweils der Grünling, links der Sinterkörper.

Bevor die Grünlinge in den Sinterofen eingesetzt werden, müssen sie in einem besonderen Arbeitsgang, dem „Entwachsen", von den organischen Zusätzen befreit werden. Dies geschieht in einem Ofen bei einer Temperatur von nahezu 1000° C. Sind die Grünlinge von den organischen Zusätzen befreit, stellt man sie auf Chargiergestelle aus Molybdän und bringt sie in einen Sinterofen (Abb. 20), wo sie bei etwa 1.700° C in reinem Wasserstoff zu dichten Körpern gesintert werden. Die maximal

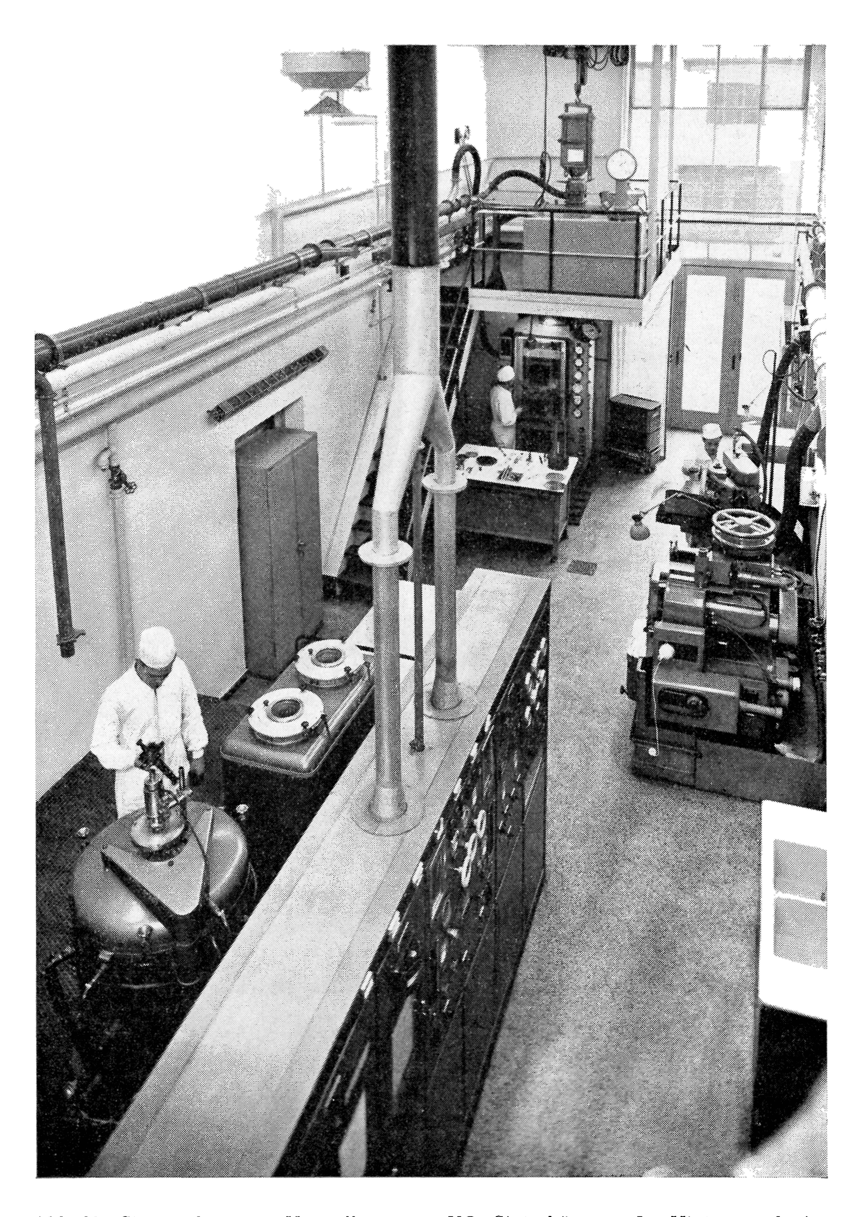


Abb. 20 Sinteranlage zur Herstellung von UO_2-Sinterkörpern. Im Hintergrund eine Presse, links im Vordergrund ein Sinterofen. Rechts Schleifmaschinen.

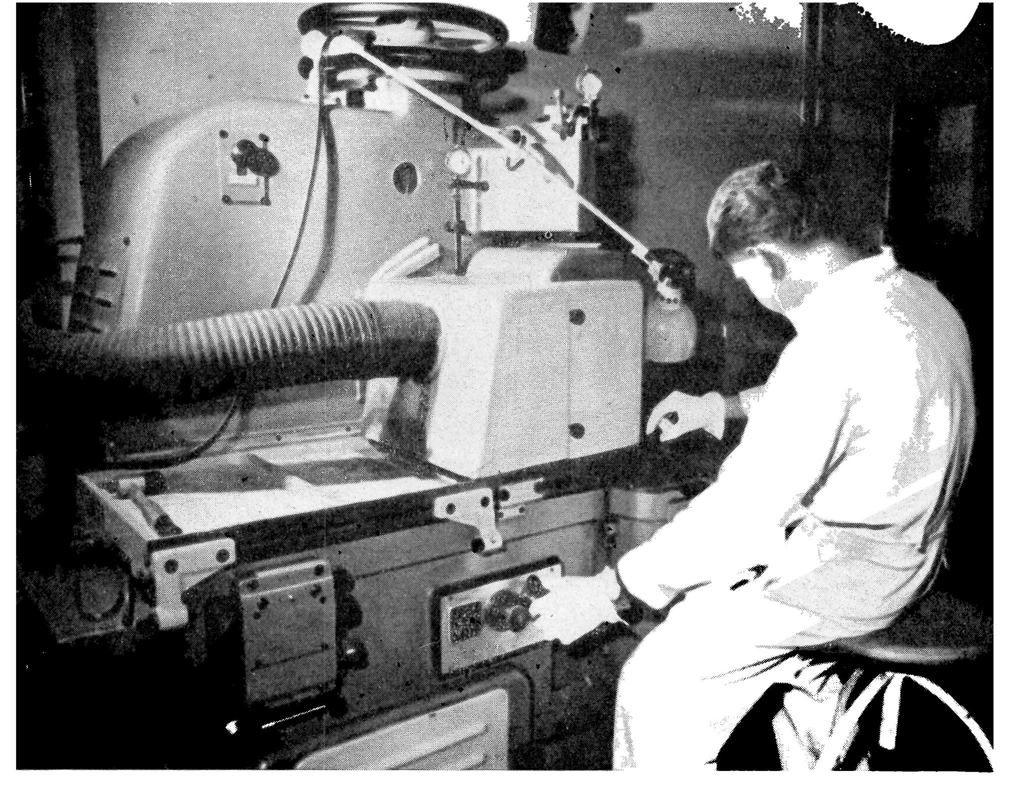


Abb. 21 Rundschleifen von UO_2-Sinterkörpern

mögliche (aus Röntgenaufnahmen ermittelte) Dichte beträgt für das UO_2 10,97 g/cm³. Erreichbar sind Dichten von 10,5–10,7 g/cm³, so daß also im Sinterkörper stets Poren vorhanden sind. Um die hohen Genauigkeitsanforderungen erfüllen zu können, müssen die Sinterkörper meist noch geschliffen werden, wobei der Durchmesser bis auf ± 0,01–0,02 mm eingestellt wird. Dies geschieht in Rundschleifmaschinen unter kräftiger Kühlung mit einer Bohremulsion (Abb. 21). Hierbei treten an den spröden Tabletten, deren Eigenschaften denen des Porzellans ähneln, leicht Kantenausbrüche auf, die nur in einem bestimmten Maße toleriert werden können. Die Tabletten müssen deshalb nach dem Schleifen sorgfältig auf Abplatzungen hin untersucht werden. Stichproben erstrecken sich auf die Feststellung von Dichte, Durchmesser, Rechtwinkeligkeit der beiden Stirnflächen usw. (Abb. 22).

Während dieser Produktionsschritte werden die Zircaloy-Rohre sorgfältig untersucht, Innendurchmesser und Wandstärke geprüft und mit Ultraschall auf Fehlstellen, besonders auf Innenrisse, getestet. Die Rohre werden entfettet, gebeizt und mit einer Endkappe einseitig verschweißt. In dieses Rohr wird die vorgelegte Tablettensäule vorsichtig eingescho-



Abb. 22
Prüfung von UO_2-Sinterkörpern.

ben. Anschließend evakuiert man das Rohr, füllt Helium ein und schweißt die zweite Endkappe auf. Das Helium im Innern soll den Wärmeübergang von den Tabletten an das Hüllrohr verbessern und die Dichtheitsprüfung mit einem Heliumlecksucher (wie es bei der Herstellung der metallischen Elemente für den FR-2-Reaktor in Karlsruhe beschrieben wurde) ermöglichen.

Die so hergestellten, mit UO_2 gefüllten und an beiden Enden verschweißten Stäbe werden einige Tage lang in Wasserdampf bei etwa 400° C und 5 atm Druck behandelt. Während dieses Vorganges, den man mit „Autoklavieren" bezeichnet, bildet sich eine glänzende schwarze Oxydhaut auf

der Oberfläche aus, die als Schutzschicht dient. Fehlerhafte Stellen verringerter Korrosionsbeständigkeit verraten sich dabei durch deutliche Verfärbung. Die auf diese Weise angefertigten Einzelstäbe werden dann entweder durch mechanische Mittel oder aber durch Schweißen bzw. Löten zum bündelförmigen Brennelement vereinigt.

3. Herstellung der plattenförmigen Brennelemente für den Schwimmbadreaktor in Geesthacht (Abb. 4 rechts)

Die Elemente für den Schwimmbadreaktor in Geesthacht bei Hamburg verkörpern den Typ der sogenannten MTR-Elemente, die sich sehr bewährt haben und in vielen Forschungsreaktoren eingesetzt werden. Solche Elemente besitzen 10 bis 20 leicht gewölbte Platten, die durch Einfügen

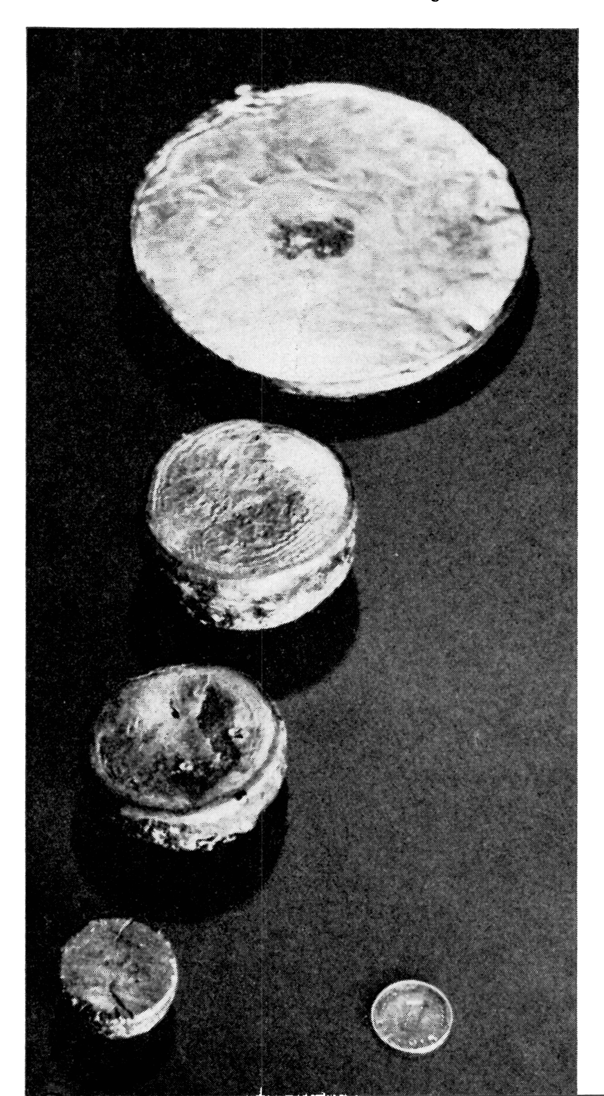
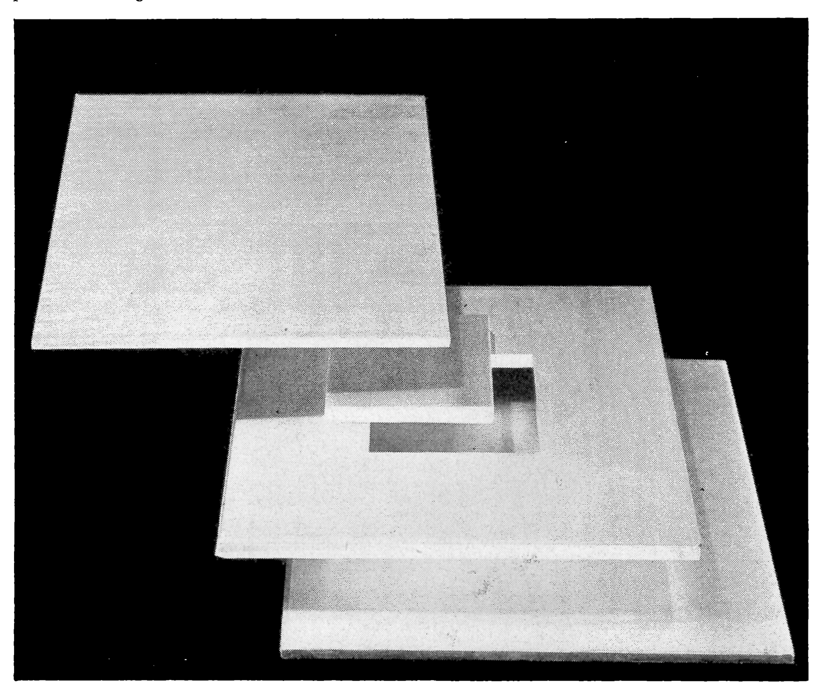


Abb. 23
Kleine Reguli aus hochangereichertem Uranmetall.
Zum Größenvergleich rechts unten ein Pfennigstück.

in zwei Seitenplatten zu einem Bündel vereinigt sind, so daß ein geschlossener Kasten entsteht, durch den das Kühlwasser gesaugt werden kann. Die Größe der einzelnen Platten ist ziemlich einheitlich, etwa 600×80×1 mm. Im Innern dieser Platten befindet sich eine dünne, etwa 0,5 mm starke Schicht aus einer U-Al-Legierung. Sie ist auf allen Seiten von reinem Aluminium als Hülse umgeben. Solche Platten werden nach der sogenannten „Bilderrahmentechnik" hergestellt, einer Walztechnik, bei der Hülse und Brennstoff wärmeschlüssig miteinander verbunden (plattiert) werden.

Der Brennstoff im Innern der Platten besteht zu etwa 80 Gewichtsprozenten aus Aluminium. Der Rest ist hochangereichertes Uranmetall. Eine solche uranarme Legierung ähnelt in ihren Eigenschaften dem reinen Aluminium und kann deshalb verhältnismäßig leicht verformt werden. Die

Abb. 24 „Bilderrahmentechnik" zur Herstellung von Brennstoffplatten. In der Mitte das „Bildchen" aus einer U-Al-Legierung; daneben Rahmen und Deckbleche aus Aluminium. Diese 4 Teile werden in der angegebenen Reihenfolge zu einem Walzpaket vereinigt.



Strahlenschäden in dieser vorwiegend aus Aluminium bestehenden Legierung bleiben gering. Die in Verbindung mit den FR-2-Elementen geschilderten Schwierigkeiten, die mit der Anisotropie des reinen Uranmetalls zusammenhängen, werden also durch Verwendung einer solchen Legierung umgangen. Allerdings verdünnt man das spaltbare Uran und kann es daher nur hochangereichert verwenden.

Bei der Reduktion von UF_4 durch Kalzium, die wegen der hohen Anreicherung nur in kleinerem Maßstab (etwa 1 kg) erfolgen kann, entstehen kleine, knopfgroße Metallplättchen (Abb. 23). Sie werden mit Aluminium legiert. Ein homogenes Legieren ist schwierig, weil sich beide Legierungspartner in ihrem spezifischen Gewicht sehr stark unterscheiden (Uran etwa 19 g/cm^3, Aluminium 2,7 g/cm^3 bei Zimmertemperatur). Die Legierung wird zu einem Barren vergossen und dieser z. B. durch Walzen zu einem Band (etwa $1/2$ cm dick und einige cm breit) verformt, das dann in einzelne rechteckige Scheiben (die sogen. „Bildchen") zerschnitten wird. Die Bildchen werden in einen Rahmen aus reinem Aluminium eingelegt, mit zwei Deckblechen versehen und das so entstehende Paket durch Schweißen an einigen Stellen fixiert (Abb. 24). Beim anschließenden Auswalzen bilden der uranfreie Rahmen und die beiden Deckbleche die Hülse des Brennstoffs. Brennstoff und Hülse sowie Rahmen und Deckbleche verschweißen miteinander, so daß die im Innern entstehende Wärme ungehindert ins Kühlmittel abfließen kann.

Das Auswalzen (Abb. 25) geschieht bei Temperaturen zwischen 450 und 550° C. Das Walzpaket wird dazu in einem Ofen vorgewärmt. Zwischen den einzelnen Walzdurchgängen werden nach Bedarf Zwischenglühungen vorgenommen. Nach 4–5 solchen Durchgängen hat die Brennstoffschicht im Innern etwa die gewünschten Dimensionen erreicht. Durch abschließendes Kaltwalzen werden die endgültigen Toleranzen eingestellt. Die Ausbildung des Brennstoffkerns im Innern läßt sich auf dem Röntgenschirm gut verfolgen. Mit Hilfe der Röntgendurchleuchtung markiert man auch auf der Außenseite der fertigen Platte den Sitz des Brennstoffkerns und schneidet das überstehende Aluminium ab. Die Platten werden dann gebogen und zum Bündel zusammengesetzt, wobei sie in Nuten der Seitenplatten eingebracht und z. B. durch Verstiften befestigt werden.

Auch bei der Fertigung dieser Elemente sind mehrere Prüfungen eingeschaltet. Am wichtigsten dürfte der Glühtest auf eine einwandfreie Bindung zwischen Brennstoffkern und Hüllschicht sein. Zu diesem Zweck werden die fertig gewalzten Platten für einige Zeit auf etwa 500° C erhitzt. Wenn an irgendeiner Stelle keine Bindung zwischen uranhaltigem Kern und uranfreier Deckplatte vorhanden war, so markieren sich diese Stellen durch Blasen, weil die Hüllschicht sich dort abhebt.

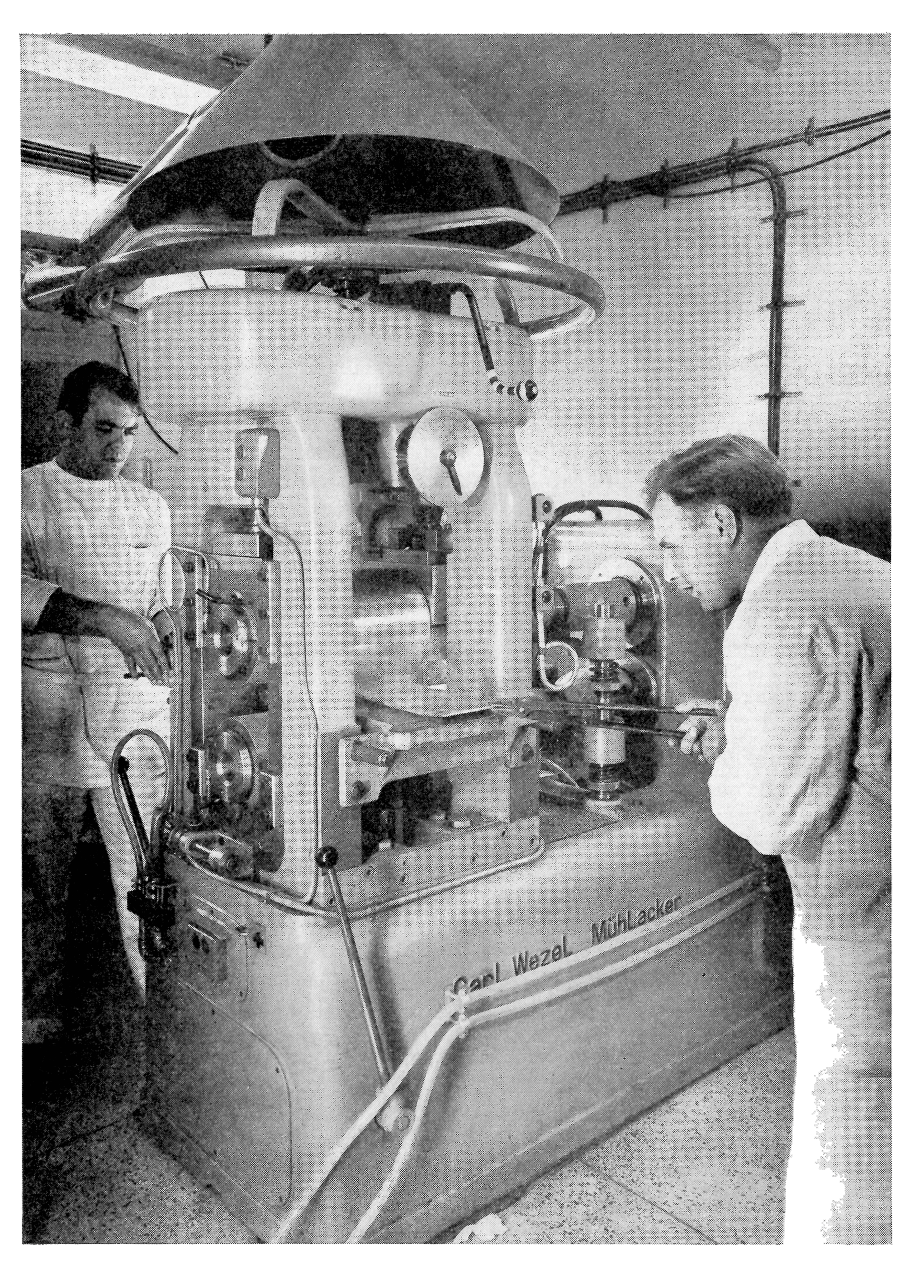


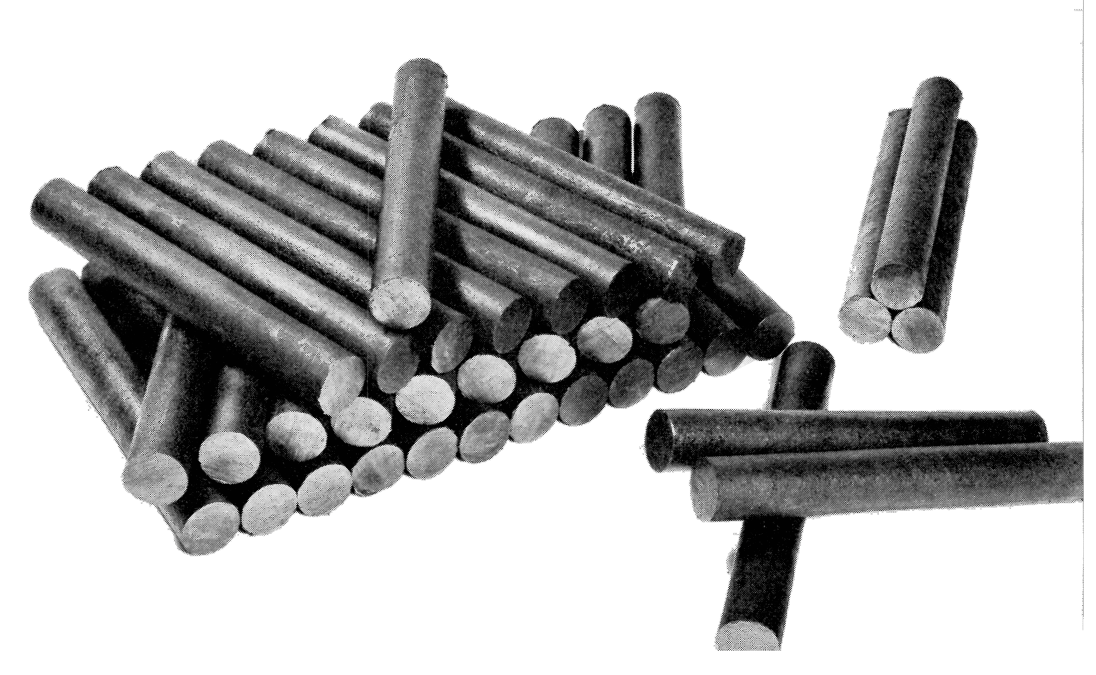
Abb. 25 Auswalzen eines Walzpaketes bei der Herstellung von Brennstoffplatten nach der „Bilderrahmentechnik".

In Tabelle II (Seite 61) sind unter Nr. 7–9 drei Argonautreaktoren aufgeführt. Brennelemente für solche Reaktoren sind in Abb. 4 links dargestellt. Auch sie stellen Plattenbündel dar; der Brennstoff innerhalb dieser Platten besteht allerdings nicht aus einer U-Al-Legierung, sondern aus einer Mischung von U_3O_8 und Aluminium. Bei der Herstellung dieser Platten wendet man ebenfalls die „Bilderrahmentechnik" an. Das uranhaltige Bildchen ist hier jedoch nicht ein Scheibchen der Legierung, sondern ein Körper, der aus dem Pulvergemisch gepreßt wird. Der Produktionsprozeß verläuft wie bei den MTR-Elementen. Das Zusammenfügen zum Element ist allerdings einfacher, weil nur ein Bolzen erforderlich ist, der – zusammen mit Abstandhaltern – die Platten zu einem Bündel zusammenfaßt.

4. Herstellung karbidischer Brennelemente

Tabelle III (Seite 62) enthält unter Nr. 18 ein Beispiel für einen karbidischen Kernbrennstoff. Es handelt sich um einen Hochtemperaturbrennstoff für den Kugelhaufenreaktor der AVR in Jülich. Das Brennelement dieses Reaktors ist in Abb. 5 dargestellt. Die bei Hochtemperaturreaktoren dieses oder ähnlichen Typs verwendete Graphithülse macht es erforderlich, Graphit als Brennstoff zu benutzen. In den kugelförmigen Brennelementen befindet sich ein beispielsweise zylinderförmiger Einsatz mit dem Karbid, das allerdings nicht reines Monokarbid UC oder Dikarbid UC_2 ist,

Abb. 26 Gegossene Stäbe aus Uranmonocarbid UC.



sondern ein Brennstoff komplizierterer Zusammensetzung. Die Entwicklung solcher und ähnlicher Brennstoffe und Brennelemente ist überall in der Welt noch nicht abgeschlossen. Deshalb sollte lediglich darauf hingewiesen werden.

Die Verwendung karbidischen Brennstoffs wird aber noch für andere Reaktoren erwogen, nämlich in Form von reinem Monokarbid UC für Reaktoren mit organischer oder Flüssigmetall-Kühlung. Die dafür benötigten Brennelemente stellen ebenfalls Bündel dar. Ihr Aufbau entspricht dem der oxydischen Elemente, wie sie z. B. im MZFR zu finden sind (vgl. Abb. 3). Anstelle der kleinen Tabletten aus UO_2 enthalten diese Elemente meist gegossene Stäbe aus UC von etwa 10 cm Länge (Abb. 26). Ausgangsmaterial für die Herstellung ist z. B. das poröse stückige UC, das durch Reaktion von UO_2-Pulver mit Graphit entsteht. (Vgl. S. 39). Es wird im Lichtbogen aufgeschmolzen (Schmelztemperatur von Monokarbid etwa 2400° C) und durch Kipp- oder Schleuderguß in Graphitkokillen vergossen. Der dabei entstehende Gußkörper erreicht nahezu die höchstmögliche Dichte von 13,63 g/cm^3. Nach dem Erstarren und Erkalten trennt man den Gußkopf ab, schleift, falls es notwendig ist, die Oberfläche und füllt die Gußstücke in vorbereitete Hüllrohre ein, wie es bei der Herstellung der MZFR-Elemente beschrieben wurde (Seite 51/52).

Bei dieser Verarbeitung muß berücksichtigt werden, daß UC leicht mit Wasser oder der Luftfeuchtigkeit reagiert, und zwar beinahe so heftig wie das bekannte Kalziumkarbid. Infolgedessen eignet sich also ein solcher Brennstoff auch nicht für wassergekühlte Reaktoren; ein geringer Schaden in der Brennelementhülse würde sofort die Reaktion mit Wasser einleiten.

Plutonium und Brutreaktoren

Bessere Ausnutzung der Spaltstoffe

Die Beschreibung von vier verschiedenen Brennstoffen und Brennelementtypen läßt einen weiten Überblick über das Gebiet der Kernbrennstoffe gewinnen. Die möglichen Brennelementformen und die Herstellungsbedingungen sind zwar vielfältiger, enthalten aber nur Varianten der geschilderten Prinzipien. Allerdings wurde als Brennstoff nur Uran mit dem spaltbaren Uranisotop U 235 betrachtet. Das Isotop 238 wurde dagegen als „Ballast" bezeichnet. Dieses Isotop kann aber mit Neutronen reagieren und ein neues spaltbares Isotop bilden, das Plutonium 239:

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239} \xrightarrow{\beta^-} {}_{93}Np^{239} \xrightarrow{\beta^-} {}_{94}Pu^{239}$$

Die Formel zeigt schematisch die Anlagerung eines Neutrons an U 238 unter Bildung eines instabilen Uranisotops, das unter Aussendung zweier Beta-

teilchen über ein Neptuniumisotop in ein Plutoniumisotop 239 verwandelt wird. Neptunium und Plutonium sind also künstliche, im Reaktor erzeugte Transuranelemente.

Die Neutronenbilanz in einem Reaktor gestattet unter bestimmten Voraussetzungen, daß für einen gespaltenen Kern von U 235 oder Pu 239 ein neuer Pu-239-Kern aus vorhandenem U 238 gebildet („gebrütet") wird. Unter diesen Bedingungen verbraucht ein Reaktor also nach Ausweis seiner Brutto-Stoffbilanz nur das nichtspaltbare U 238. Aus physikalischen Gründen arbeiten diese Anlagen ohne Moderator, verwenden zur Spaltung also schnelle Neutronen. Diesen sogenannten „Schnellen Brutreaktoren" wird eine wichtige Rolle bei der Deckung des zukünftigen Energiebedarfs zugeschrieben. Reaktoren dieser Art werfen erhebliche physikalische und technische Probleme auf. Ihre Entwicklung wird an einigen Stellen der Welt, u. a. im Kernforschungszentrum Karlsruhe, betrieben.

Brennelemente solcher Reaktoren enthalten also als spaltbaren Stoff Plutonium, das ebenfalls als Metall, Oxyd, Karbid oder in Form eines Dispersionsbrennstoffs eingesetzt werden kann. Insofern unterscheiden sich solche Elemente nicht von denen, die Uran enthalten. Plutonium sendet allerdings – viel stärker als Uran – eine harte Alphastrahlung aus. Seine Handhabung wirft also ganz neue Probleme auf; sie kann nur in Handschuhkästen erfolgen und geschieht damit anders als die Verarbeitung von unbestrahltem Uran, das nur eine sehr schwache Radioaktivität besitzt. Zur Gewinnung des Plutoniums müssen außerdem die hochradioaktiven Elemente des Brutreaktors aufgearbeitet werden.

Bei der Diskussion der Brutreaktoren ergeben sich also ganz neuartige Gesichtspunkte. Die Verwendung stets neuen Urans bedeutet ja Raubbau an den begrenzten Uranvorräten der Erde. Wenn aber der Energiebedarf in Zukunft nennenswert aus der Kernspaltung gedeckt werden soll, muß neben der Herstellung und Verarbeitung von frischem, praktisch inaktivem Uran als Brutstoff für die Reaktoren auch erbrütetes Plutonium als Brennstoff gewonnen und verarbeitet werden. Frisches Uran und erbrütetes Plutonium bilden dann zusammen die neuen Brennstoffe für die Brutreaktoren.

Unter diesen Gesichtspunkten erhält die gegebene Übersicht über die Brennelementherstellung den Charakter einer Momentaufnahme. Die Produktionsmethoden sind einer allmählichen Wandlung unterworfen. Sie werden in steigendem Maße ergänzt durch Herstellungsmethoden, die durch die Verarbeitung hochradioaktiver Materialien gekennzeichnet sind. Dem Chemiker und Metallurgen, Physiker und Ingenieur bieten sich hier für die Zukunft neue und interessante Betätigungsgebiete.

Fließschema für die Herstellung natürlicher- und angereicherter Kernbrennstoffe aus Uranerz

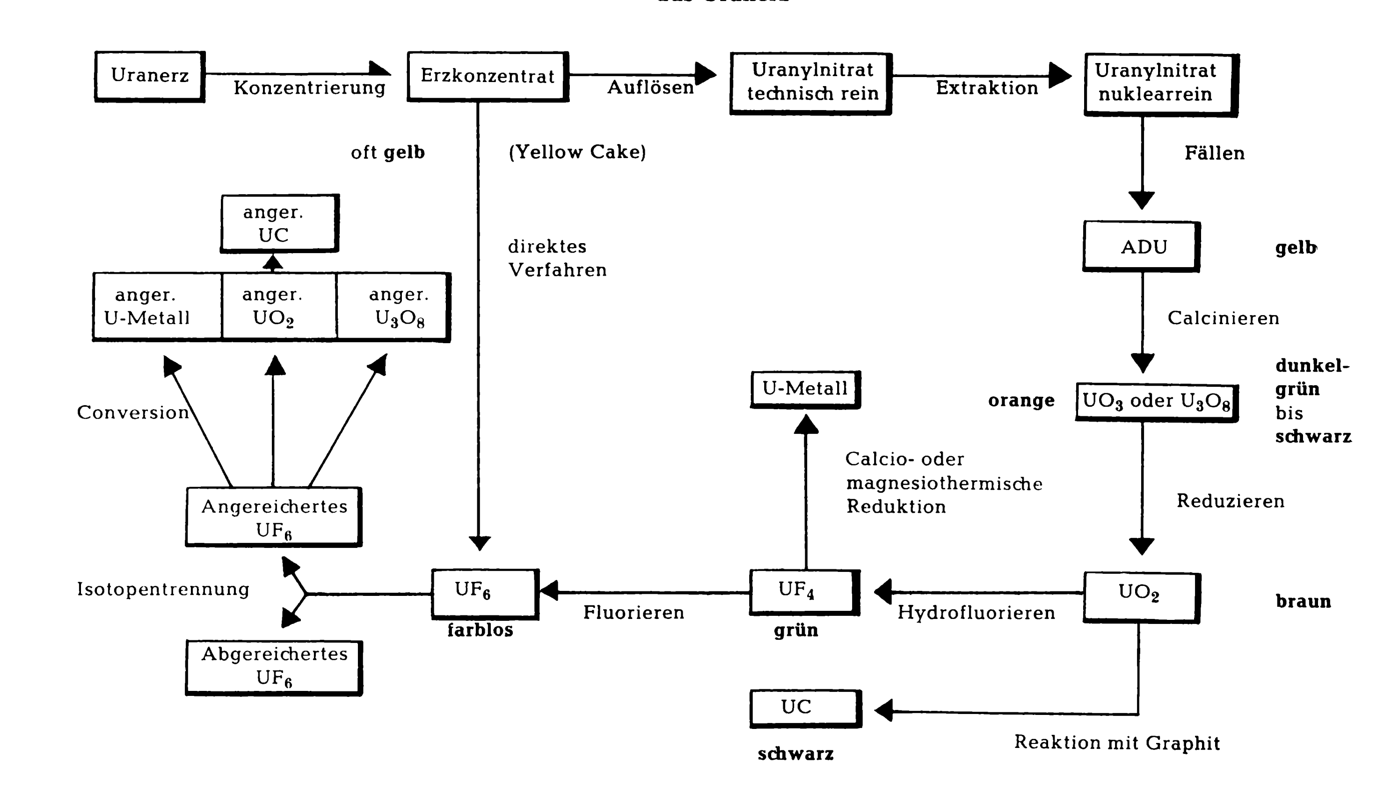


Tabelle II

Forschungsreaktoren in der Bundesrepublik Deutschland

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Nr.	Bezeichnung	Standort	Reaktor-Typ	therm. Leistg. in kW	Brennstoffart	Kühlmittel	Anreich. in %	Gestalt der Elemente
1	FR-2	Karlsruhe	Tank	12.000	Uranmetall	D_2O	natürl.	Stangen
2	DIDO	Jülich	Tank	10.000	U-Al-Legierung	D_2O	80–90	Plattenbündel
3	FRG	Geesthacht	Schwimmbad	5.000	U-Al-Legierung	H_2O	90	Plattenbündel
4	MERLIN	Jülich	Schwimmbad	5.000	U-Al-Legierung	H_2O	80–90	Plattenbündel
5	FRM	München	Schwimmbad	1.000	U-Al-Legierung	H_2O	90	Plattenbündel
6	TRIGA	Mainz	Schwimmbad	100	U-Zr-H	H_2O	20	Stäbe
7	SAR	München	Argonaut	1	U_3O_8-Al-Mischung	H_2O	20	Plattenbündel
8	AEG-Prüfreaktor	Gr.-Welzheim	Argonaut	0,01	U_3O_8-Al-Mischung	H_2O	20	Plattenbündel
9	SAR	Karlsruhe	Argonaut	0,01	U_3O_8-Al-Mischung	H_2O	20	Plattenbündel
10	BER	Berlin	homogen	50	Uransalzlösung	H_2O	20	keine Elemente
11	FRF	Frankfurt	homogen	50	Uransalzlösung	H_2O	20	keine Elemente
12	SUR-100	München	Unterrichts-reaktor	0,0001	U_3O_8-Polyaethyl. Dispersion	keine Kühlung	20	keine Elemente
13	SUR-100	Berlin	Unterrichts-reaktor	0,0001	U_3O_8-Polyaethyl. Dispersion	keine Kühlung	20	keine Elemente
14	SUR-100	Darmstadt	Unterrichts-reaktor	0,0001	U_3O_8-Polyaethyl. Dispersion	keine Kühlung	20	keine Elemente

Tabelle III

Leistungsreaktoren in der Bundesrepublik Deutschland

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Nr.	Bezeichnung	Standort	Reaktor-Typ	el. Leistung in MW	Brennstoffart	Kühlmittel	Anr. in %	Gestalt der Elemente
15	VAK	Kahl a. M.	Siedewasser	15	UO_2	H_2O	~ 2,5	Stabbündel
16	KRB	Gundremmingen a. d. Donau	Siedewasser	~ 240	UO_2	H_2O	~ 2,5	Stabbündel
17	MZFR	Karlsruhe	Druckwasser	50	UO_2	D_2O	natürl.	Stabbündel
18	AVR	Jülich	Hoch-temperatur	15	U-Karbid	He	20	Kugeln

Erklärung der Abkürzungen:

Anr. = Anreicherung

VAK = „**V**ersuchs**a**tom**k**raftwerk **Kahl**."

KRB = „**K**ern**k**raftwerk **RWE**-**B**ayernwerk"

MZFR = „**M**ehr**z**weck**f**orschungs**r**eaktor"
Er ist seiner Hauptbestimmung nach ein Forschungsreaktor, verkörpert jedoch auch den Typ eines Kraftreaktors.

AVR = „**A**rbeitsgemeinschaft **V**ersuchs**r**eaktor"

Das Deutsche Atomforum

Das Deutsche Atomforum ist am 26. Mai 1959 in Karlsruhe gegründet worden. Am 3. Februar 1961 wurde es in einen e. V. überführt und sein Sitz von Düsseldorf nach Bonn verlegt. Das Deutsche Atomforum fördert die friedliche Verwendung der Kernenergie durch:

1. Behandlung technischer und wissenschaftlicher Aufgaben im nationalen und internationalen Rahmen;
2. Ausarbeitung technischer Richtlinien, Vorschriften und Normen;
3. Förderung der Diskussion über gemeinsame Bestrebungen der Unternehmen, die an der friedlichen Verwendung der Atomkernenergie interessiert sind;
4. Zusammenarbeit mit der Legislative und Exekutive des Bundes und der Länder;
5. Pflege des Kontaktes zu ausländischen Atomforen und zu internationalen Atomorganisationen;
6. Aufklärung der Öffentlichkeit über die friedliche Verwendung der Atomkernenergie;
7. Errichtung einer ständigen Atomlehrschau und Durchführung von Wanderausstellungen.
8. Beschäftigung mit Fragen der Weltraumforschung und Raumfahrttechnik.

Um die Bewältigung dieser vielfältigen Aufgaben bemühen sich ehrenamtlich zahlreiche Mitglieder des Deutschen Atomforums, für deren Arbeit folgende 6 Arbeitskreise gebildet wurden:

Wissenschaft und Technik
Öffentlichkeitsarbeit und Presse
Recht und Verwaltung
Wirtschaft und Industrie
Auslandsbeziehungen
Messe- und Ausstellungswesen

Neben Bundestagsabgeordneten und Politikern aller im Bundestag vertretenen Parteien, den zuständigen Bundes- und Länderministerien, Wissenschaftlern, Vertretern von Industrie, Technik und Medizin haben sich dem Atomforum Angehörige nahezu aller Berufs- und Bevölkerungskreise angeschlossen.

Präsident des Forums ist:
Prof. Dr.-Ing. Dr. Dr. rer. nat. h. c. Karl Winnacker, Frankfurt a. M.-Hoechst, stellvertretender Vorsitzender der Deutschen Atomkommission.

Dem Präsidium gehören ferner an:
Fürst Otto von Bismarck, MdB; Dr. Thomas Dehler, MdB; Prof. Dr.-Ing. Heinz Goeschel; Prof. Dr. Werner Heisenberg; Dr. Felix A. Prentzel; Dr.-Ing. Dr. rer. nat. E. h. Heinrich Schult; Dr. H. Veit, MdL.

Die Geschäftsstelle des Deutschen Atomforums e. V. befindet sich in Bonn, Koblenzer Straße 240, Telefon: 2 70 37—39.